

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Snímače tlaku pro elektronické systémy řízení
zážehových a vznětových motorů**

**Pressure sensors for electronic control systems
of diesel and petrol engines**

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Vach

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Snímače tlaku pro elektronické systémy řízení zážehových a vznětových motorů

Pressure sensors for electronic control systems of diesel and petrol engines

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši koncepčních řešení a funkčních vlastností snímačů tlaku pro elektronické systémy řízení zážehových a vznětových motorů.
2. Na základě instrukcí vedoucího proveďte praktické ověření vlastností vybraných vybraných typů snímačů.
3. Dle pokynů vedoucího bakalářské práce vypracujte typizovanou laboratorní úlohu s využitím dynamické válcové zkušebny.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petrovi Šimoníkovi za rady a připomínky k obsahu a formě zpracování.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá snímači tlaku využívaných k elektronickému řízení zážehových a vznětových motorů. Jedná se o rešerši koncepčních řešení a funkčních vlastností snímačů tlaku. Teoretická část se na úvod zabývá požadavky, které musí snímače splňovat a moderními trendy vývoje. V hlavní části teorie jsou pak rozebrány vlastnosti a principy funkce snímačů tlaku v sacím potrubí, přeplňování, snímačů paliva a brzdové kapaliny. Práce se také podrobněji zabývá technologií mikromechanických snímačů tlaku. Praktická část se zabývá měřením a ověřováním funkčních vlastností snímače tlaku u vozidla s přeplňovaným vznětovým motorem. Abychom dosáhli potřebného zatížení motoru, bylo měření prováděno s využitím dynamické válcové zkušebny.

Klíčová slova: snímač tlaku, snímač plnicího tlaku

Abstract

This bachelor work deals with pressure sensors used for electronic control of petrol and Diesel engines. It contains the search of conceptual solutions and functional properties of pressure sensors. The theoretical part in the introduction is engaged in requirements which must be fulfilled by pressure sensors and in new development trends. The main part of the theory contains the analysis of properties and principles of pressure sensor functions in the suction tube and of supercharging and fuel and brake fluid sensors. The work also deals in more details with the technology of micromechanical pressure sensors. The practical part contains the measurement and verification of pressure sensor functional properties of the vehicle with the forced induction Diesel engine. To reach the necessary engine load, the measurement was carried out with the use of dynamic brake test room.

Key Words: pressure sensor, manifold pressure sensor

Obsah

1. Úvod	7
2. Teorie	8
2.1. Hlavní požadavky na snímače	8
2.1.1. Vysoká spolehlivost	8
2.1.2. Nízké výrobní náklady	8
2.1.3. Tvrdé provozní podmínky	9
2.1.4. Malé rozměry	10
2.1.5. Vysoká přesnost	10
2.2. Mikromechanické snímače tlaku	12
2.2.1. Úvod	12
2.2.2. Technologie mikroobrábění křemíku	12
2.2.3. Piezorezistivní snímače tlaku	16
2.2.4. Kapacitní snímače tlaku	19
2.3. Snímač tlaku v sacím potrubí, snímač tlaku přepřínování	21
2.4. Snímač tlaku s referenčním vakuem na straně struktury	22
2.5. Snímač tlaku s referenčním vakuem v dutině	24
2.6. Snímač atmosférického tlaku	25
2.6.1. Úvod	25
2.6.2. Provedení	25
2.7. Tlustovrstvé snímače tlaku	26
2.7.1. Úvod	26
2.6.1. Princip činnosti	26
2.8. Snímače vysokého tlaku	28
2.8.1. Úvod	28
2.8.2. Snímač tlaku nafty	28
2.8.3. Snímač tlaku benzínu	28
2.8.4. Piezorezistivní snímač tlaku paliva	29
2.8.5. Snímač tlaku brzdové kapaliny	29
2.8.6. Kapacitní snímač tlaku brzdové kapaliny	30
3. Praktická část	31
3.1. Úvod	31
3.2. Měření snímače plnicího tlaku nasávaného vzduchu	31
4. Závěr	38
5. Použité zdroje a citace	39
6. Seznam příloh	40

1. Úvod

Dnešní moderní vozidla, která musí splňovat přísné normy provozu vzhledem k životnímu prostředí a stejně tak nároky na komfort a bezpečnost při jízdě pro cestující a podání maximálního výkonu při co nejmenší spotřebě paliva, jsou vybavena moderními elektronickými systémy pro řízení spalovacích motorů.

Právě na základě implementace těchto elektronických systémů do vozidel je možné dosáhnout nebo se alespoň přiblížit k co nejlepším hodnotám již zmiňovaných požadavků při provozu vozidel. Elektronické systémy zajišťující optimální řízení motoru jsou založeny na několika klíčových prvcích, z kterých celková koncepce standardně vychází. Tyto prvky jsou následující: snímače a čidla požadovaných hodnot, akční členy dále řídicí jednotky, které jsou mozkiem celého systému a vodiče díky kterým mohou navzájem tyto prvky komunikovat pomocí elektrických signálů.

Funkci celého systému řízení spalovacího motoru si můžeme představit jako regulaci. Snímače a čidla pracující na fyzikálním např. pohybovém nebo chemickém principu přeměňují tyto veličiny na elektrické signály, které jsou po vodičích přenášeny do řídicí jednotky, kde slouží jako informace o aktuálním stavu regulované veličiny. Řídicí jednotka tyto signály v digitální formě zpracovává a na základě výpočtů pomocí algoritmů, které jsou v jednotce naprogramovány, ovládá výstupními elektrickými signály akční členy. Akční členy na základě těchto signálů provádí regulaci tak, aby bylo dosaženo požadované hodnoty.

Průměrná vozidla dnes využívají několik desítek snímačů a u vozů vyšších tříd může tento počet dosahovat i stovek. Významnou část tvoří snímače tlaku např. snímač tlaku v sacím potrubí, snímač tlaku paliva a brzdové kapaliny jsou nedílnou součástí každého vozu. Stále více se také rozšiřují snímače tlaku v komfortních a bezpečnostních systémech např. snímač tlaku v pneumatikách. Velká část těchto snímačů je založena na technologii mikroobrábění a do budoucna se počítá s jejím rozšířením.

2. Teorie

2.1. Hlavní požadavky na snímače

Snímače pro použití v automobilovém průmyslu na rozdíl od snímačů běžně dostupných na trhu musí být přizpůsobeny speciálním požadavkům elektronických systémů v automobilu. Při vývoji a výrobě těchto snímačů je tedy kladen důraz na využití nejmodernějších trendů a zároveň musí být dodržováno několik důležitých požadavků. Hlavní požadavky, které je nutno splňovat budou podrobněji popsány níže v textu.

2.1.1. Vysoká spolehlivost

Z pohledu spolehlivosti dělíme jednotlivé snímače pro motorová vozidla podle jejich úkolů do tří základních tříd:

1. Řízení, brzdy, ochrana pasažérů
2. Motor, hnací ústrojí, podvozek, pneumatiky
3. Komfort, diagnostika, informační systémy a zajištění proti odcizení

Je důležité zmínit, že požadavky nejvyšší třídy spolehlivosti v automobilovém průmyslu plně odpovídají vysokým hodnotám požadavků, které jsou uplatňovány v jiných technologicky náročných odvětvích a to především letectví a kosmonautika. Často vyžadují stejná opatření jako zde.

Vysoké spolehlivosti je dosahováno především konstrukčními opatřeními za použití vysoce spolehlivých komponent a materiálů pro jejich výrobu a dále pak uplatnění robustních i osvědčených technik. Především je výhodné vyhnout se co nejvíce rozebíratelným a potencionálně poruchovým spojovacím místům. Tohoto je dosaženo díky integraci systémů nebo využití bezdrátových snímačů na bázi prvků SAW (Surface Acoustic Wave, Povrchová akustická vlna) s anténní vazbou, které se obejdou bez nutnosti kabelového propojení. Pokud je požadována z jistých důvodů větší bezpečnost tohoto systému, používají se paralelně měřicí snímače se stejnou funkcí tzv. redundantní systémy snímačů. [1]

2.1.2. Nízké výrobní náklady

Vzhledem k tomu, že dnešní moderní vozidla jsou vybavena velkým množstvím snímačů 60 - 70, tento počet se také samozřejmě liší podle výbavy daného vozu. Předpokládají se tedy nízké výrobní náklady oproti snímačům používaných v jiných oblastech. Koncové náklady (typická oblast cca: 40 až 1000 Kč) se pohybují často až 100krát níže, než u konvenčních snímačů stejné výkonnosti, přičemž náklady obzvlášť při zavedení nové techniky nebo technologie se pohybují ve vysoké cenové hladině a postupně se snižují.

Velké efektivnosti při výrobě snímačů se dosahuje automatizací výrobních procesů. Například při výrobě polovodičových snímačů se na jednom křemíkovém plátku dokáže vyrobit 100 až 1000 kusů snímačů díky technologii nazývané „batch processing“. [1]

Taková výrobní zařízení jsou schopna vyprodukovat okolo 1 až 10 milionů kusů ročně, což se úplně nevyplatí, pokud někdy toto množství několikrát přesahuje poptávku jednoho dodavatele. Jednoznačně lze říci, že vysoká potřeba automobilového průmyslu dosud hrála bezprostřední, průkopnickou roli a stanovila nová měřítká.

2.1.3. Tvrdé provozní podmínky

Velkou výhodou při snímání je, pokud jsou snímače umístěny bezprostředně v místě požadovaného měření, což bývá často na obzvlášť exponovaných místech vozidla. Snímače jsou tedy vystaveny extrémnímu prostředí a musí být schopny odolávat nejrůznějšímu namáhání:

- Mechanickému (vibrace, nárazy, ...)
- Klimatickému (teplota, vlhkost, ...)
- Chemickému (např. stříkající voda, solná mlha, provozní kapaliny, kyselina akumulátoru, ...)
- Elektromagnetickému (rušivé záření, rušivé impulsy přenášené kabely, přepětí, apod.)

Tyto skutečnosti vedli k velkému ztížení požadavků.

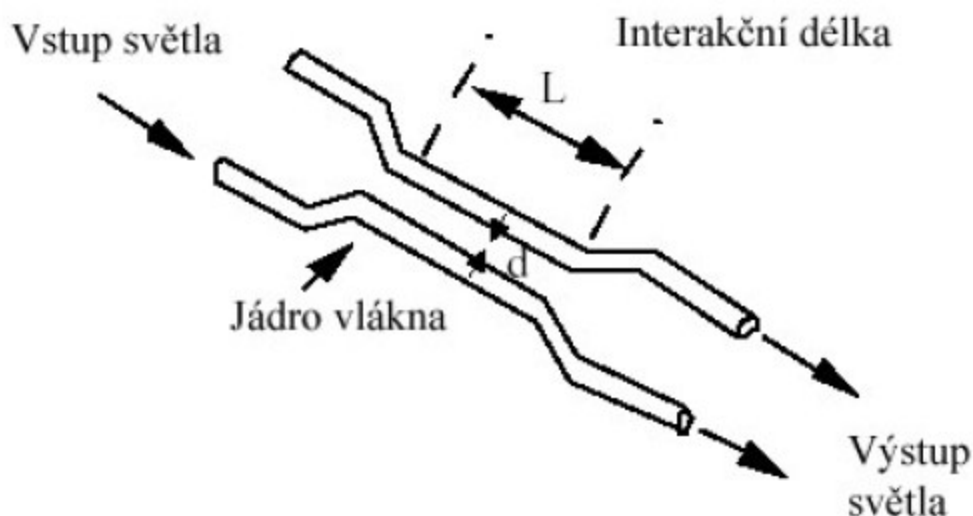
Vzhledem k uvedenému zatížení je nutné provádět ochranná opatření, vyžadující rozsáhlé zkušenosti v technice zapouzdřování. Mimo jiné sem patří:

- Pasivační technika (zabraňující korozi a narušení povrchu kovu) a technika připojování
- Technika utěšňování a spojování
- Ochranná opatření proti elektromagnetickému rušení EMC (elektromagnetická kompatibilita)
- Montáž omezující kmitání snímače
- Metody testování životnosti a metody simulace
- Použití odolných materiálů a velmi dobrá znalost namáhání v místě montáže

Je tedy zřejmé, že kvalita snímačů závisí na dodržení těchto ochranných opatření. Tato opatření často tvoří větší část z celkové ceny snímače než vlastní měřicí prvek.

V tomto směru spěje vývoj k nasazení snímačů s optickými vlákny, kde je možné v závislosti na měřené veličině ovlivňovat světlo vedené optickými kabely (sklo, plast). Odpadá tak elektromagnetické rušení, až k místu, kde se světelné signály převádí opět na elektrické. Ceny těchto měřicích prvků a doprovodné techniky jsou ale zatím značně vysoké.

Obrázek 1 představuje dvě optická jádra, která jsou položena velmi blízko u sebe. Pro jedno modové optické vlákno se vzdálenost pohybuje v rozmezí 10 – 20 mikronů.



Obr. 1 Optický senzor založený na přechodu světla. Variací vzdálenosti „d“ vlivem teploty, tlaku, deformace, lze snímat vlivy vnějšího prostředí působící na senzor. [2]

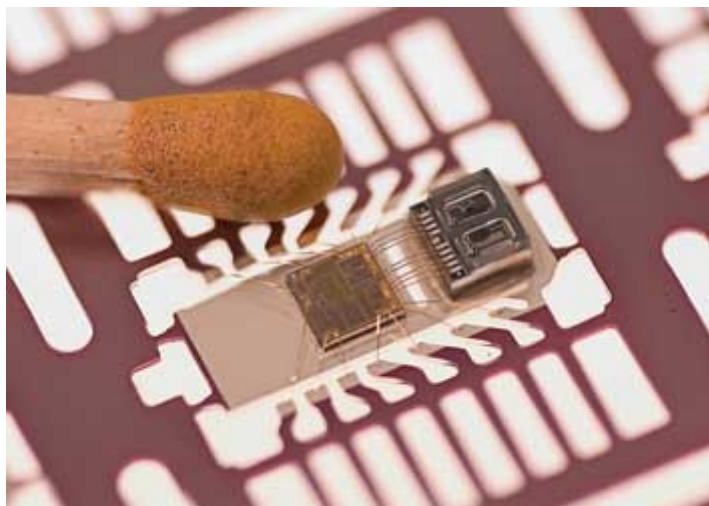
2.1.4. Malé rozměry

Výrobci jsou tlačeni ke konstrukci provedení snímačů v extrémně malých rozměrech, jednak proto, že počet elektronických systémů ve vozidlech stále roste a jednak se projevuje snaha o co nejkompaktnější tvary vozidel, při současném zachování komfortu vnitřního prostoru pro cestující. Také důslednou minimalizaci hmotnosti vozidla způsobuje požadavek na co nejnižší spotřebu paliva.

Aktuálními trendy ve vývoji je využití technologických znalostí miniaturizace elektronických součástek z oblasti výroby integrovaných obvodů:

- Vrstvové hybridní techniky (rezistory závislé na roztahování, teplotě a magnetickém poli)
- Techniky výroby polovodičů (Hallowy snímače a snímače teploty)
- Povrchová a bulk mikromechanika (snímače tlaku a zrychlení z křemíku, viz obrázek 2)

Mikrosystémové techniky (kombinace dvou nebo tří mikrotechnik, např. mikroelektroniky a mikromechaniky)



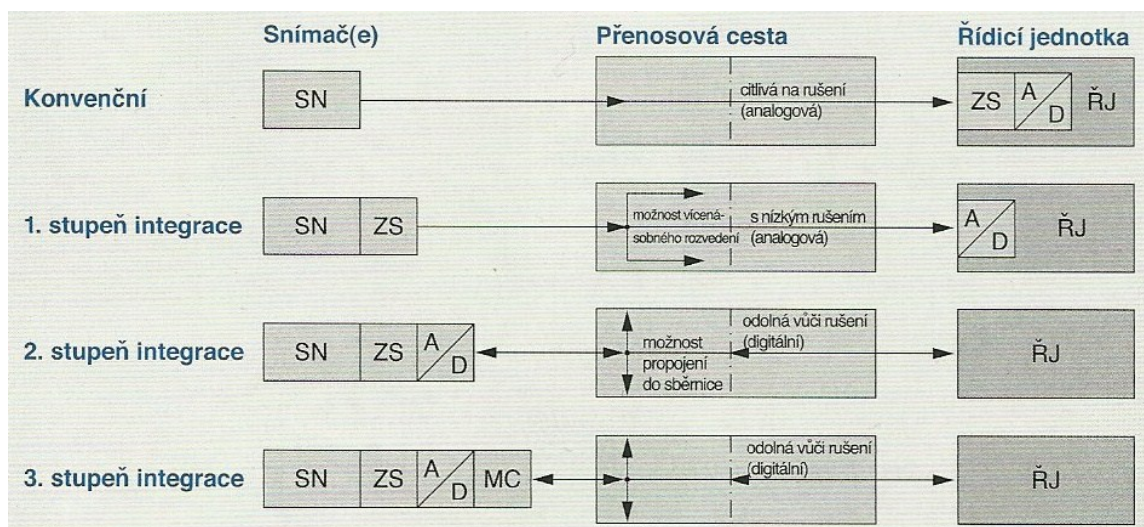
Obr. 2 Mikromechanický snímač tlaku v pneumatikách v mikroskopickém zvětšení [3]

Běžně se do pouzder snímačů integrují také nezbytně nutné elektronické obvody. Díky použití tohoto systému dochází ke značnému snížení nákladů a prostoru. V budoucnu již nebudou používány téměř žádné jiné systémy.

2.1.5. Vysoká přesnost

V automobilovém průmyslu na rozdíl např. od procesního průmyslu jsou požadavky na přesnost snímačů až na určité výjimky (např. měřič hmotnosti nasávaného vzduchu) spíše nižší. Přihlédneme-li pak k nevyhnutelnému procesu stárnutí materiálů, pohybují se přípustné tolerance z konečné hodnoty měřicího rozsahu cca kolem jednoho procenta. Přesnou kompenzací rozptylu vzorků a techniky vyrovnání účinných kompenzačních opatření proti rušivým vlivům je možné těchto hodnot dosáhnout. Tyto požadavky je dnes již ve velké míře možno splnit, nicméně i tyto systémy jsou stále náročnější a komplexnější a tedy i zde se projevují vyšší nároky. [1]

Aby bylo dosaženo vysoké přesnosti, musí vývoj směřovat především ke zpřesnění technik vyvážení a kompenzace a snížení výrobních tolerancí. Hlavní roli zde však hraje a je zásadním krokem kupředu hybridní nebo monolitická integrace elektronických obvodů pro zpracování signálů a snímačů v místě měření až po komplexní digitální obvody jako analogově digitální převodníky a mikropočítače.



Obr. 3 Stupně integrace snímačů [1]

Popis obrázku: SN – snímač/e, ZS – zpracování signálu (analogové), A/D – analogově digitální převodník, ŘJ – řídicí jednotka (digitální), MC – mikropočítač

Použitím těchto mikrosystémů též označovaných jako „inteligentní snímače“ je plně využito přesnosti snímače a dále pak přináší další množství výhod:

- Odlehčení řídicí jednotky
- Jednotné flexibilní rozhraní vhodné k připojení ke sběrnici
- Vícenásobné využití snímačů
- Využití menších měřicích efektů a vysokofrekvenčních měřicích efektů (zesílení a demodulace na místě)
- Korekce odchylek snímačů v místě měření, jakož i společné vyvážení a kompenzace snímače a elektroniky zjednodušené uložením korekčních informací v paměti PROM

Použitím matematického modelu snímače a určením parametrů modelu specifických pro daný exemplář uložených v paměti PROM, je při současném snímání a digitalizaci rušivých veličin požadovaná měřená veličina vypočítána prakticky bezchybně. Tento způsob značně vylepšuje statické i dynamické vlastnosti snímačů. [1]

Také struktury s více snímači, které buď pomocí několika stejných snímačů, nebo snímačů odlišných snímají vícevrstvé stavy a případně ihned mohou provádět redukci jejich informací, vyžadují integrovanou elektroniku přímo v místě měření.

Zvýšení spolehlivosti měření tlaku je dosaženo použitím více integrovaných snímačů tlaku. Dále lze díky použití více snímačů vytvořit střední hodnotu měřené veličiny a redukovat tak nepravidelné odchylky (drifty) způsobené stárnutím použitých materiálů snímačů. Pokud jsou jednotlivé měřicí buňky dimenzovány na vysokou přetížitelnost (např. kapacitní) při různých měřicích rozsazích, pak je pomocí takového snímače extrémně rozšířen rozsah měření současně s vysokou přesností.

2.2. Mikromechanické snímače tlaku

2.2.1. Úvod

V automobilové oblasti jsou pro snímání tlaku nejrozšířenější mikroeletromechanické snímače (MEMS) a zároveň je to jedna z jejich nejúspěšnějších aplikací. Výzkum v oblasti mikromechanických snímačů začal již před několika lety a od té doby došlo k řadě změn ve vývoji mikroobrábění a technologii materiálů. Mikromechanické snímače tlaku využívají několik snímacích technik, jako jsou piezorezistivní, kapacitní, rezonanční a optické, tyto snímače se staly úspěšné v řadě komerčních aplikací. Mechanickým prvkem snímačů je obvykle mikromechanická membrána.

Díky možnosti masové výroby, miniaturních a vysoce výkonných snímačů při nízkých nákladech se tato technologie stala velice atraktivní pro automobilový průmysl. Mikromechanické snímače tlaku se používají téměř v každé části vozidla, jako jsou, sací potrubí, válce, brzdová kapalina, tlak v pneumatikách a vstřikování paliva. V automobilovém průmyslu jsou snímače umístěny na náročných místech, proto je důležité pečlivé zpracování jejich konstrukce a zapouzdření.

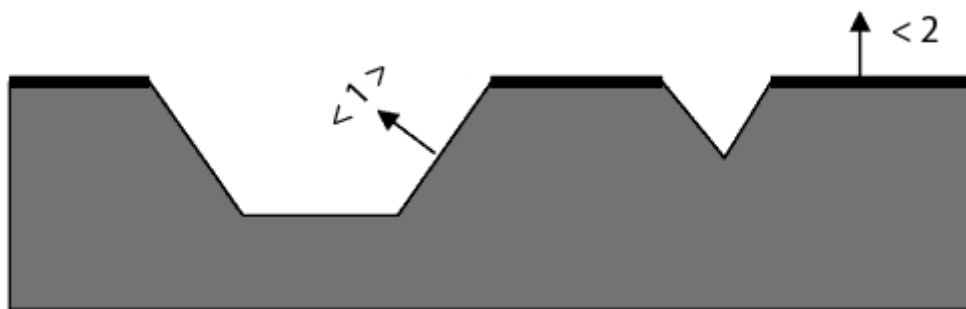
Jak již bylo zmíněno mikromechanické snímače běžně využívají membránu. Membrána je v podstatě pružná plochá nebo vlnitá destička upnutá kolem svého okraje. Tlak působící na membránu způsobuje její deformaci, velikost tlaku je pak úměrná této deformaci (prohýbání). Tlak je určen na základě měření velikosti odchylky nebo deformace součástí povrchu membrány. Struktura membrány může být vyrobena pomocí technologie mikroobrábění křemíku BULK nebo surface (povrchová), tyto technologie budou popsány v dalším textu.

2.2.2. Technologie mikroobrábění křemíku

Vývoj technologie MEMS je založen na schopnostech mikroobrábění řady mikromechanických součástí z křemíkového substrátu. Tyto mikromechanické výrobní procesy vychází v mnoha případech z vývoje mikroeletroniky a MEMS významně těží z technologií vyvinutých v polovodičovém průmyslu. Například vzory a tvary definované na povrchu destičky využívají stejné fotolitografické metody používané v oblasti mikroeletroniky. Jedná se o světlo citlivý polymer (fotorezist) nanesený na povrchu destičky a osvětlovaný přes vzorovanou fotomasku. Křemík je velmi dobrý mechanický materiál, který se vlastnostmi přibližuje k nerezové oceli, je tvrdší než železo a má menší hustotu než hliník. [4] Rovněž nabízí možnost, že elektronické obvody mohou být integrovány na čipu snímače.

Technologie BULK

Mikroobrábění technologií bulk je proces, při kterém se odstraní materiál ze substrátu, čímž vzniká mechanická struktura. K dispozici je několik možností leptání substrátu křemíků, nejobvyklejším je anizotropní mokré leptání křemíku. Proces mokrého leptání využívá kapalných chemických leptadel a termín anizotropní znamená, že leptání křemíku probíhá v různém poměru podle směru krystalické mřížky. Typickým příkladem takového leptadla je hydroxid draselný, který leptá roviny (2, viz obrázek 4) 400 krát rychleji než roviny (1). Když jsou destičky orientované v rovině (2), leptáním se vytváří pravoúhlá membrána se šikmými bočními stěnami, které kopírují rovinu (1). [4] Vzhledem k tomu, že je známa a přesně kontrolována krystalografie křemíkových destiček umožňuje proces anizotropního leptání opakovat stejné rozměry membrány. Hloubku leptání lze ovládat pomocí dobře řízeného časování leptacího procesu nebo výhodněji pomocí tzv. stop vrstvy, kdy je v křemíkové destičce přítomen oxid jako izolátor nebo zastavením elektrochemického leptání.



Obr. 4 Křemíková membrána s anizotropicky vyleptanými žlábků

Oblasti destiček, kde není požadováno leptání, jsou chráněny pasivační nebo maskovací vrstvou. Materiál maskovací vrstvy musí být vysoce odolný vůči konkrétním leptadlům, které jsou použity. V případě mokrého leptání křemíku jsou maskovací vrstvy z oxidu křemičitého SiO_2 nebo nitridu křemíku Si_3N_4 . [4] Tyto pasivační vrstvy musí být nejprve leptány v definovaném tvaru membrány přes povrch substrátu. Toto se obvykle provádí procesem suchého leptání, jak bude popsáno níže. Mokré leptání je dávkový proces, při kterém je možné produkovat stovky zařízení současně v celé skupině destiček. Kromě anizotropního leptání křemíku je také rozšířené mokré izotropní leptání oxidu křemičitého a hliníku.

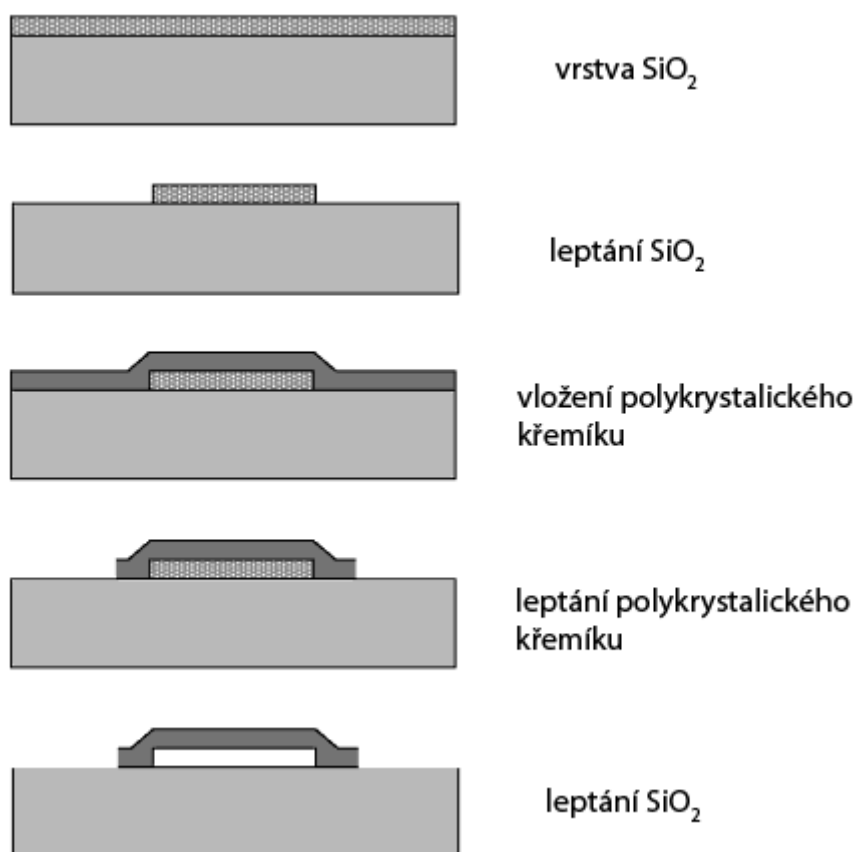
Materiál může být hromadně odstraněn také pomocí „suchého“ leptání, při kterém se využívá leptání křemíku plazmou. Suché leptání se obvykle používá v kombinaci chemického leptání a fyzického odstranění materiálu (bombardováním substrátu). Stupeň anizotropie bude záviset na povaze použitého plazmatu a poměru chemického a fyzického leptání. Výběr materiálu pro suché leptání je mnohem větší, než u procesu mokrého leptání a je tedy možné použít širší škálu maskovacích vrstev. Vzorovaný fotorezist je schopen odolat mnoha procesům suchého leptání a může tedy být použit jako maskovací vrstva pro několik leptání.

Leptání plazmou nabízí mnohem vyšší míru kontroly v porovnání s mokrým leptáním a přesto že cenové sazby za leptání destiček se mohou lišit, má tento způsob v mikroelektronických aplikacích přednost. Velmi atraktivní proces mikroobrábění a stále více uplatňovaný při výrobě mikromechanických snímačů tlaku je hloubkové leptání reaktivními ionty, ve kterém může být leptání křemíku s vertikálními bočními stěnami (typicky $90^\circ \pm 1^\circ$) a velmi vysoké poměry stran výška k šířce až 40:1. [4]

Mikroobrábění technologií Bulk se široce používá pro výrobu snímačů tlaku, neboť možnosti tohoto procesu vyhovují požadavkům na rozměry v typických aplikacích snímání tlaku. Schopnost vyrobit membránu z jediného krystalu křemíku také nabízí významné výhody vzhledem k jeho vynikajícím mechanickým vlastnostem a piezorezistivitě. Mezi hlavní nedostatky Bulk technologie patří větší velikost zařízení a tedy menší počet vyrobených zařízení na jednu destičku a snížená kompatibilita s procesy mikroelektroniky, což může znesnadňovat integraci elektroniky na snímač.

Technologie Surface (povrchová)

Technologie Surface je povrchové mikroobrábění, při kterém se mechanická konstrukce tvoří na povrchu substrátu. Postup vychází z několika vrstev materiálu, které jsou napařeny a vzorovány na povrchu destičky a tvoří konstrukci. Nejjednodušší způsob povrchového mikroobrábění je použít ochrannou (obětní) vrstvu, jak je znázorněno na obrázku 5.



Obr. 5 Povrchové mikroobrábění

Vrstva jednoho typu materiálu např. oxidu křemičitého je napařena na podkladu a vzorována. Jiný typ materiálu je pak uložen za první vrstvou na horní straně substrátu a rovněž vzorován. Ve finální fázi je první vrstva odleptána a druhá vrstva tvoří samonosnou konstrukci. Tento postup vyžaduje dobrou selektivitu leptání použitého k odstranění prvního materiálu a způsobu napaření materiálu s nízkou úrovní pnutí.

Leptání ochranné vrstvy obvykle zahrnuje použití kapalného leptadla. Na základě kapilárních sil z odpařování oplachovací kapaliny (deionizované vody) se může vytvarovaná mechanická konstrukce dostat do styku s podkladem a zůstat k němu přilepena. Obvykle je ochranná vrstva oxid křemičitý a mechanický materiál z polykrystalického křemíku, tento postup střídání několika vrstev může být poměrně složitý. Jednotlivé vrstvy materiálů jsou napařeny pomocí chemických par. Při tomto procesu probíhá reakce několika druhů plyných látek na povrchu substrátu a může být proveden při nízkém tlaku, atmosférickém tlaku nebo s plazmatickým zvýšením. [4]

Výroba membrány povrchovým mikroobráběním je poměrně jednoduchá ale problémy způsobuje nutnost leptání ochranné vrstvy. Tento problém lze vyřešit buďto uzavírací membránou nebo vyleptáním přístupových otvorů ze zadní části destičky pomocí Bulk technologie. Membrány

vyrobené povrchovou technologií jsou obvykle mnohem menší než vyrobené pomocí technologie Bulk a používané postupy jsou kompatibilní s integrovanou elektronikou. Hlavní nevýhodou jsou nižší mechanické vlastnosti vrstvy (často se liší kus od kusu) polykrystalického křemíku, vznikající výkyvy při zpracování.

Vytváření vazeb, lepení

Vytváření vazeb a spojování různých povrchů dohromady je dalším klíčovým procesem mikroobrábění široce používaným při výrobě a zapouzdření snímačů tlaku. Postupy vytváření vazeb povrchů umožňují nejprve objednávat pouzdra, v nichž mají být destičky provedeny, čímž se sníží náklady a složitost následného zapouzdřování. Mezi procesy existují různé vazby, vhodnost jednotlivých závisí na použitém materiálu, požadavcích aplikace (např. hermetické těsnění) a teplotní omezení.

Hermetické těsnění je nezbytné například při výrobě snímače absolutního tlaku, protože na jedné straně membrány musí být udržováno vakuum. Při každém takovém procesu má zásadní význam čistota, neboť cizí částice vedou k tvoření dutin, které oslabují vazby a zhoršují těsnost. V úvahu je třeba brát také pnutí vznikající při spojování materiálů, protože to může ovlivnit chování snímačů. Toto platí zejména při spojování různých druhů materiálů a při zvýšených teplotách. Dále je důležité zvážit uvolňování vazeb a všech vnitřních pnutí v průběhu stárnutí, neboť to by vedlo k dlouhodobému driftu na výstupu snímače.

Pro spojení křemíku a skla se běžně používá anodizace. Metoda využívá kombinaci elektrostatického pole a zvýšených teplot. Při tomto procesu je záporný potenciál na skleněném materiálu a montáž probíhá při teplotě vyšší jak 350°C. Velikost potenciálu závisí na tloušťce použitého skla a na tloušťce oxidů přítomných na křemíkové destičce (až do 100nm). Výsledné elektrostatické pole přitahuje destičky do vzájemného kontaktu a v kombinaci s vysokou teplotou vytváří dokonale hermetickou chemickou vazbu. Obvykle se používají skla Pyrex 7740 nebo Schott Borofloat 33, obě tato skla mají podobný koeficient tepelné roztažnosti na křemík. [4] V křemíku je také možné vytvořit úzké drážky na průchodky, aniž by byla snížena hermeticitata. Tento proces může být také použit pro spojení „křemíku do křemíku“ za předpokladu, že se na povrch napaří nebo rozpráší tenká vrstva skla. Bez ohledu na podobné teplotní roztažnosti, zde i přesto vzniká malé zbytkové pnutí.

V současné době je rutinní proces používaný při zhotovení křemíkových destiček mikromechanických systémů také spojování roztaveného křemíku. Vzhledem k tomu, že tato technika nevyžaduje žádné mezi vrstvy materiálu je zbytkové pnutí ve spojené dvojici minimální. Povrchy materiálů vyžadují speciální přípravu, oba musí být čisté, rovné a hydratované. Dvě destičky se spojují dohromady při pokojové teplotě a díky Van der Waalsovým silám okamžitě drží u sebe. Vazba se dokončuje při teplotě obvykle nad 800°C. [4] Takovéto vazby jsou plně hermetické a s nízkým pnutím, nicméně požadované vysoké teploty nejsou kompatibilní s některými postupy či materiály.

Mezi jiné vazby patří například použití eutektického křemíku zlata, který se roztaví při teplotě 363°C, vytvoří kapalnou vrstvu a potom se ochlazuje. Podobný proces spojení lze dosáhnout se skleněnou fritou, která se taví při teplotách 350°C a 450°C. [4] Použitím obou postupů dosáhneme dobré hermetické těsnosti ale se zvýšeným pnutím materiálu. Hermeticky slabších vazeb lze také dosáhnout použitím polymerních lepidel. Pružného charakteru lepidla pak může být využito k zamezení nežádoucích pnutí pouzdra.

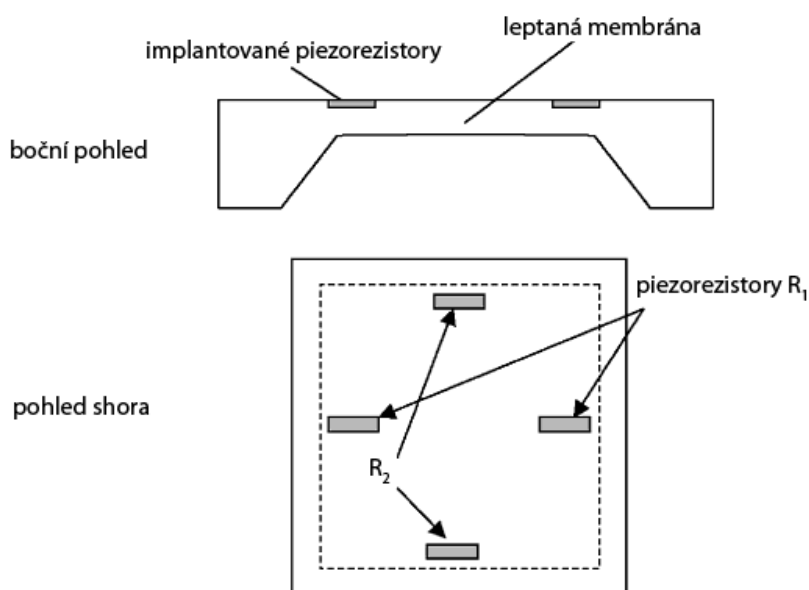
Zapouzdření

Zapouzdření mikromechanických snímačů je jedním ze základních procesů vývoje a náklady na něj jsou často přehlíženy. Přitom náklady na zapouzdření mohou snadno převážit náklady na čip a konstrukce pouzder hraje zásadní roli ve funkčnosti a výkonnosti snímačů. Pouzdra musí snímače ochránit od vlivů životního prostředí a umožnit jim jejich funkčnost a stejně tak musí v některých aplikacích být ochráněno životní prostředí od snímačů. Dále pouzdro musí chránit snímač před samotným tlakovým médiem při přenosu tlaku na snímač, to se obvykle provádí pomocí membránové bariéry z nerezové oceli a dutinami na zadní straně senzoru pro odvod hydraulické kapaliny. Dokonce i základní pouzdra musí minimálně poskytovat tlakové vyústky a izolace od nežádoucích namáhání.

Pro mikromechanické snímače lze použít podobné pouzdra jako pro integrované obvody (plastové, keramické a kovové) ale vzhledem k tomu, že konstrukce pouzder vždy komplikuje základní interakci systému s jeho okolím, je nutná zakázková výroba pouzder pro každou aplikaci. Zapouzdřením destiček již při jejich spojování můžeme zjednodušit finální konstrukci pouzdra. Speciálně pak snímače pro vysoké zatížení vyžadují pečlivou konstrukci pouzdra, které je ochrání od nežádoucích sil.

2.2.3. Piezorezistivní snímače tlaku

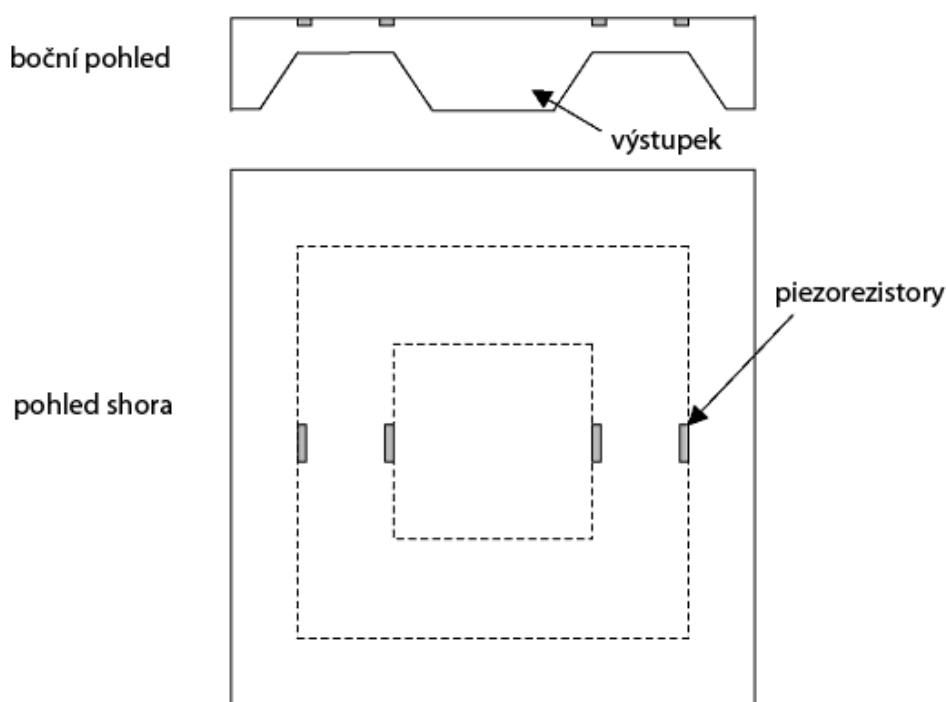
Velmi rozšířený způsob měření napětí na mikromechanické membráně je použití difundovaných nebo implantovaných křemíkových piezorezistorů a také to byla jedna z prvních aplikací MEMS. Dříve se používaly křemíkové tenzometry pájené na kovové membráně. Tento postup byl nahrazen mikromechanickými křemíkovými membránami. Předchozí postupy neumožňovaly dávkovou výrobu a náklady na zařízení byly vysoké. Vývoj anizotropního leptání výrazně zlepšil geometrii a rozsah membrány, kterého může být dosaženo, a zároveň se snížily náklady. Tento proces se tedy stal hlavním pro výrobu snímačů tlaku MEMS. Také vývojem ionizačního implantování rezistorů a mikromechanickým obráběním povrchu byla snížena velikost a došlo ke zlepšení výkonu piezorezistivních snímačů tlaku.



Obr. 6 Anizotropně leptaný snímač tlaku s piezorezistory

Typický anizotropně leptaný piezoezistivní snímač tlaku je na obrázku 6. Membrána je vyleptána a na každé straně podél okraje jsou umístěny rezistory. Rezistory jsou orientovány ve stejném směru, dva rovnoběžné s maximálním napětím (R_1) a dva na sebe kolmé (R_2). Rezistory jsou použity s příměsí typu „p“ ty mají největší a lineární piezorezistivní účinek. [4] Rezistory znázorněné na obrázku 6 vytváří stejné a opačné změny odporu. Dva páry rezistorů umístěné na opačných stranách jsou v zapojení Wheatstonova můstku, tím je maximalizována citlivost membrány na působící tlak.

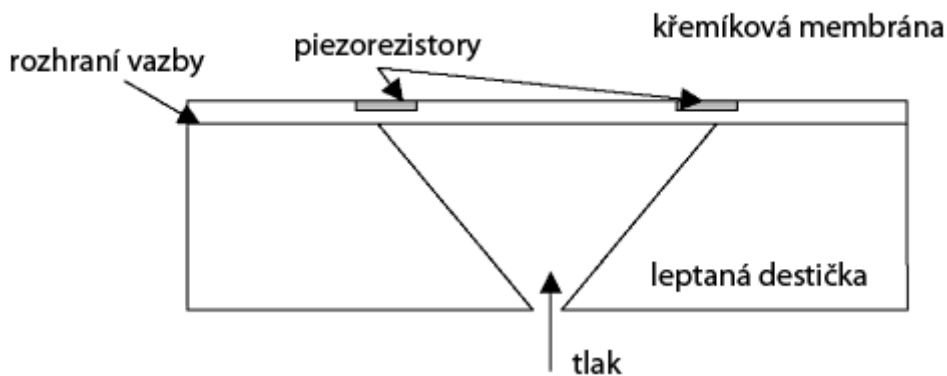
Pro zlepšení linearitu a citlivosti piezorezistivních snímačů tlaku byla modifikována základní struktura membrány. Použitím anizotropního leptání byl vyroben pevný výstupek na středu membrány. Jak je znázorněno na obrázku 7, výstupek je spojen s rezistory a umožňuje stejné a opačné napětí na vnitřní a vnější straně párů rezistorů. Takové uspořádání zlepšuje nelinearitu membrány v obou směrech a je vhodnější pro diferenciální aplikace. Další konstrukce mohou být se dvěma výstupky ve středu membrány.



Obr. 7 Rozmístění rezistorů na membráně s výstupkem

Rovněž se u základních membrán a membrán s výstupkem používají meandrové rezistory s různými typy příměsí. Konstrukce meandru maximalizuje citlivost napětí rezistoru a také pro větší citlivost zvětšuje délku rezistoru.

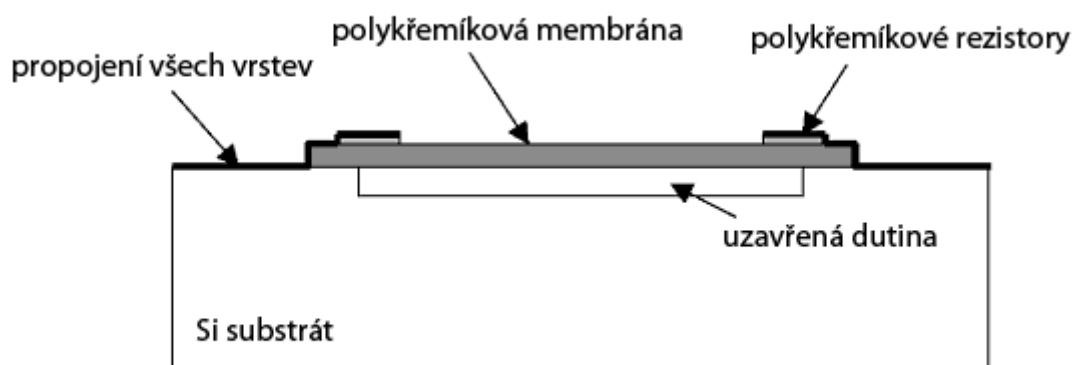
Hlavní nevýhodou použití křemíkových piezorezistorů je citlivost na teplotu. Změny odporu vlivem teploty mohou překračovat změny vznikající působením tlaku. Teplotní kompenzace může být dosaženo pomocí zapojení rezistorů do můstku, jak je znázorněno na obrázku 6. V tomto zapojení působí změny teploty na všechny rezistory stejně a vliv teploty je minimalizován. Nicméně výrobní tolerance teplotních koeficientů každého rezistoru mohou být mírně odlišné. Alternativně může být do čipu snímače integrováno snímání teploty, což umožňuje kompenzaci teploty pomocí vyhledávací „lookup“ tabulky nebo algoritmu. Tento postup však vyžaduje rozsáhlejší kompenzace teploty a tlaku, což je časově náročné a drahé. Teplotní limity piezorezistorů jsou přibližně 125°C v důsledku omezení p-n přechodu. [4]



Obr. 8 Snímač tlaku s nadifundovanými piezorezistory

Na základní konstrukci piezorezistivních snímačů mají vliv pokroky v technologiích a materiálech. Například díky fúznímu spojování křemíku se snížila velikost čipu a membrána destičky se anizotropní vyleptává, jak je znázorněno na obrázku 8.

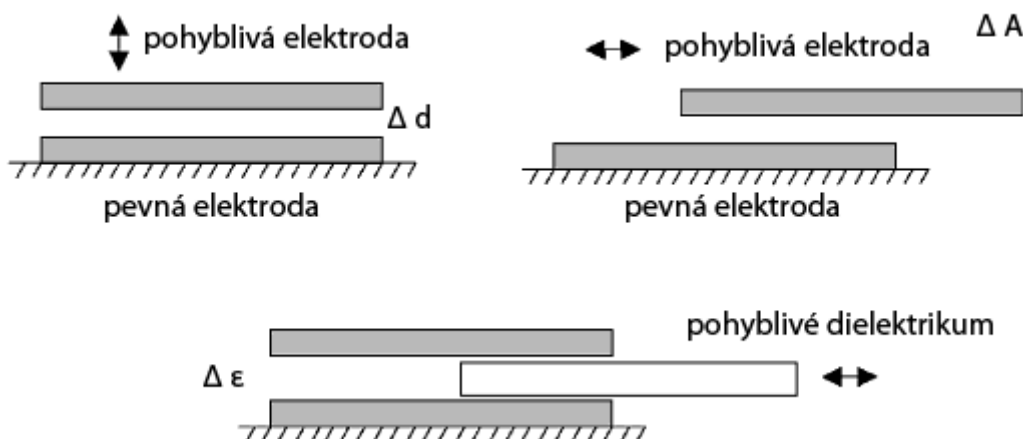
Zde byly popsány snímače s membránou vyrobené z polykrystalického křemíku a nitridu křemíku. Obě zařízení využívají křemíkové polykrystalické rezistory, které snímají výchylky membrány a používají se jako snímače absolutního tlaku. K zachycení vakua v uzavřeném prostoru pod membránou a utěsnění otvorů se využívá chemické metody depozice z plynné fáze. Průřez snímače z polykrystalického křemíku je na obrázku 9.



Obr. 9 Mikromechanický snímač tlaku s membránou z polykrystalického křemíku

2.2.4. Kapacitní snímače tlaku

Kapacitní snímání umožňuje přesné snímání na základě pohybu a je široce používané pro snímače MEMS. Kapacitní snímač je obvykle tvořen jednou nebo více pevnými elektrodami a jednou nebo více pohybujícími se elektrodami. Schopnost integrovat elektronické obvody pro úpravu signálu blízko k povrchu kapacitního snímače umožňuje vyrábět vysoce citlivé a dobře teplotně kompenzované snímače. Obrázek 10 ukazuje 3 kombinace jednoduché struktury deskových kondenzátorů.



Obr. 10 Příklad jednoduchého kapacitního snímače

Popis obrázku: 1) Proměnná mezera, 2) proměnné prostředí, 3) pohyblivé dielektrikum

Pro takovou strukturu kondenzátoru je kapacita dána následující rovnicí:

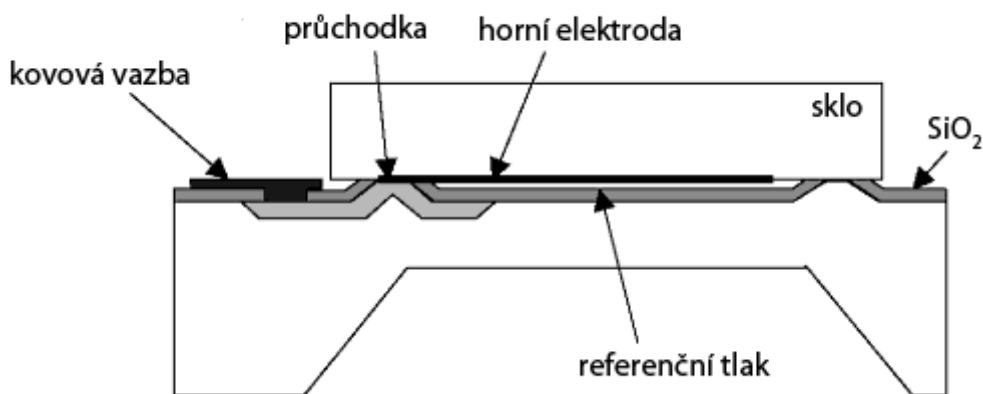
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} [F] \quad \text{Rovnice 1 [4]}$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita dielektrika materiálu mezi deskami, „A“ je oblast překrytí mezi deskami a „d“ je rozdíl. Jak je patrné z obrázku 10, kapacita může být změněna jednou nebo více proměnnými. Takové konstrukce kondenzátorů je poměrně jednoduché vyrobit a snímače tlaku tohoto typu membrány jsou velmi rozšířené. V MEMS technologii se také běžně používají složitější konstrukce jako interdigitální kondenzátory.

Kapacitní metody snímání mají ze své podstaty menší šum na rozdíl od piezoelektrických, které jsou ovlivňovány teplotou. Nicméně u mikromechanických snímačů jsou kapacity velmi malé (často v rozmezí femto až atto Farad) a šum z elektronických obvodů může nakonec být vyšší než u piezoelektrických snímačů. Existuje řada postupů pro měření změn kapacity, jako jsou použití nábojového zesilovače, střídavý můstek pro měření impedance a různé konfigurace oscilátorů. Současný vývoj umožňuje integraci planárních cívek do čipu snímače tlaku. Kondenzátory a cívky jsou jako rezonanční obvod LC, jejich frekvence se mění se změnami aplikovaného tlaku. Může být také použita externí cívka, která může být využita i jako anténa pro detekci rezonanční frekvence, tento postup je atraktivní pro využití bezdrátového snímání.

Do budoucna by měli být vyráběny mikrosystémy s cívkou ze zlata na keramickém substrátu. Existuje také řada komerčně dostupných integrovaných obvodů navržených pro kapacitní snímače. Nicméně s cílem snížit vliv parazitní kapacity a dosažení vyšších výkonů by měl být snímač tlaku integrován s elektronikou. To vyžaduje použití mikromechanické technologie v kombinaci s CMOS obvody pro měření kapacity. Malá velikost těchto snímačů však může vést ke snížení citlivosti, ale to je možné řešit současným zhotovením více membrán na matrici. Použitím více membrán s různou citlivostí tlaku na jedné matrici vede současně k rozšíření rozsahu těchto zařízení.

Kapacitní snímače tlaku jsou obvykle založeny na paralelním uspořádání, kdy jedna elektroda je pevně přichycena a druhá je schopna vychýlení při působení tlaku. Změna mezery mezi elektrodami pak znamená změnu kapacity. Snímač tlaku je zobrazen na obrázku 11. Skládá se z křemíkové anizotropně leptané membrány s pevnou elektrodou z pokoveného skla Pyrex 7740. [4] Sklo a křemík jsou spojeny pomocí anodizace. Tento snímač se prokazuje vysokou citlivostí tlaku, nízkou spotřebou a nízkou teplotou ovlivňující citlivost.



Obr. 11 Mikromechanický kapacitní snímač tlaku (provedení)

Hlavními nevýhodami spojenými s kapacitním snímáním tlaku jsou nelineární výstup snímače a složitost vyhodnocovací elektroniky. Nelineární výstup je patrný z rovnice 1, protože změna kapacity je nepřímo úměrná rozdílu výšky. Kromě toho se bude membrána prohýbat a nebude rovnoběžně s pevnou elektrodou, čímž se zavádí další nelinearita na výstup snímače. Použitím membrány s výstupkem uprostřed můžeme tento efekt snížit. Maximální průhyb membrány totiž nastává uprostřed, kde vzniká místo maximální nelinearity.

Snímáním kapacity v prstencovém prostoru kousek od středu membrány se nelinearita snižuje avšak na úkor snížení citlivosti. Další možností a opět na úkor citlivosti je tedy sevření středu membrány a vytvořit tak s citlivé tlakové struktury prstencový tvar. Citlivost takové struktury je poloviční od standardní ploché desky ale nelinearita klesá na 0,7%. [4] Další možností je provozovat snímač v kontaktním režimu, kdy se membrána dotýká pevné elektrody. Membrána je ve středu v kontaktu s pevnou elektrodou a působením tlaku se tato oblast kontaktu rozšiřuje. Pohybem elektrod od sebe a k sobě vzniká tření, které způsobuje hysterezi a riziko vzniku elektrostatického náboje.

Podobné mikromechanické snímače tlaku se realizují pomocí SOI destiček (křemík na izolační vrstvě). Jako ochranná vrstva je použit oxid a uprostřed membrány je otvor, který umožňuje podleptání. Do otvoru je poté přidán nitrid křemíku, kterým se membrána vytvaruje do prstencového tvaru a otvor je utěsněn.

2.3. Snímač tlaku v sacím potrubí, snímač tlaku přepřňování

Snímač tlaku v sacím potrubí

Snímač je pneumaticky propojen se sacím potrubím a snímá absolutní hodnotu tlaku nasávaného vzduchu. Ve stejném pouzdru může být integrován i snímač teploty nasávaného vzduchu. Naměřené hodnoty tlaku jsou v podobě frekvenčně modulovaného pravoúhlého nebo sinusového napětového signálu vedeny do řídicí jednotky, kde jsou dále zpracovány. V paměti řídicí jednotky jsou uloženy tabulky hodnot tlaku odpovídající velikosti napětí přivedeného ze snímače. Řídicí jednotka tedy podle hodnoty napětí zjišťuje odpovídající velikosti tlaku právě z této tabulky. Tato data jsou velmi důležitá pro sledování aktuálního zatížení motoru a pro palubní diagnostiku EOBd.

Ke sledování změn nasávaného vzduchu v sacím potrubí v závislosti na provozních podmínkách tedy zatížení motoru se využívá současně se snímáním tlaku také snímání hmotnosti nasávaného vzduchu. Naměřené hodnoty tlaku nebo hmotnosti nasávaného vzduchu jsou důležité pro:

- výpočet doby vstřiku
- výpočet okamžiku zapálení směsi
- sledování systému zpětného vedení výfukových plynů
- a také pro systém odvzdušňování nádrže

U systému využívajícího k měření tlaku v sacím potrubí pouze snímače tlaku pro zjištění zatížení motoru, neexistuje oproti systému se snímačem hmotnosti vzduchu žádný matematický vztah mezi tlakem v sacím potrubí a hmotností nasávaného vzduchu. Pro výpočet hodnoty zatížení je v řídicí jednotce použito přizpůsobovací pole charakteristik. Následně jsou kompenzovány změny teplot a podíl zbytkových plynů vzhledem k výchozímu stavu. [5]

Snímač tlaku přepřňování

Snímač tlaku přepřňování je umístěn v sacím potrubí těsně za chladičem nasávaného vzduchu a rovněž může být v jednom pouzdře se snímačem teploty. Snímač tedy měří absolutní hodnotu tlaku vůči vakuu (typicky 2,5bar) [1] mezi turbodmyčadlem a motorem.

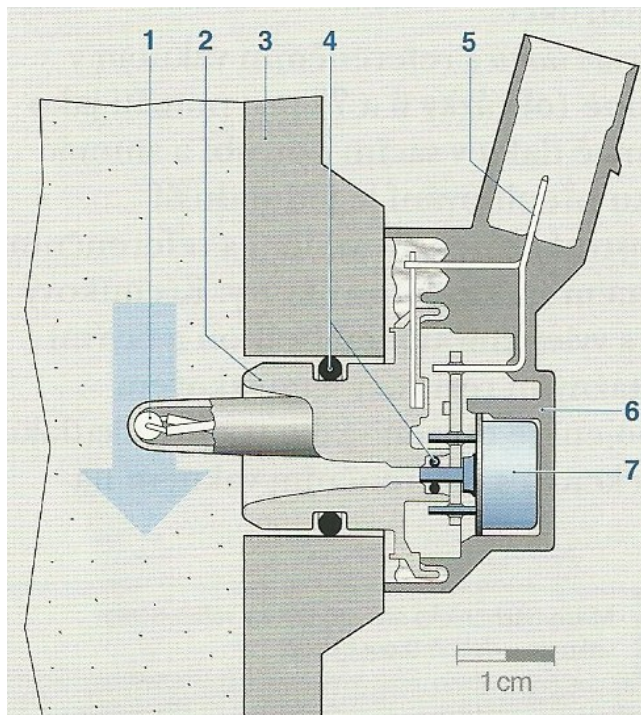
Na základě signálu snímače tlaku pak řídicí jednotka dodatečně reguluje vstřikované množství paliva a počátek vstřiku. Řídicí jednotka také naměřené hodnoty používá pro regulaci a kontrolu plnicího tlaku. V řídicí jednotce se naměřená hodnota tlaku porovnává s požadovanými hodnotami z charakteristik plnicího tlaku. Pokud se skutečná hodnota tlaku liší od požadované, řídicí jednotka prostřednictvím regulačního ventilu nebo servomotoru turbodmyčadla doreguluje plnicí tlak na správnou hodnotu.

Pokud přestane snímač tlaku pracovat nebo se vyskytne závada na vedení, dojde tedy k přerušení signálu vstupujícího do řídicí jednotky a regulace plnicího tlaku již není možná. Z bezpečnostních důvodů dojde k omezení točivého momentu a snížení plnicího tlaku na nízkou hodnotu přednastavenou v řídicí jednotce. Výpadek snímače tlaku plnicího vzduchu způsobuje mírné omezení točivého momentu také u nepřepřňovaných vznětových motorů. Řídicí jednotka nastaví nižší hodnotu tlaku vzduchu, tím je zabráněno vzniku tzv. černého kouření.

2.4. Snímač tlaku s referenčním vakuem na straně struktury

Úvod

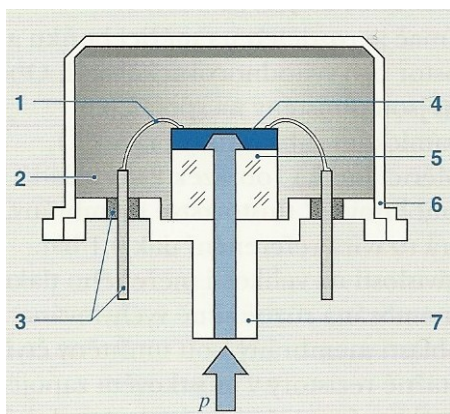
Jak již bylo zmíněno, tento typ snímačů se používá pro měření tlaku v sacím potrubí a tlaku přeplňování, další využití je pro měření tlaku paliva a oleje. Na obrázku 11 je zobrazena konstrukce snímače umístěného v sacím potrubí. Ve společném pouzdru může být integrován i snímač teploty, jehož signál je vyhodnocován nezávisle na snímači tlaku.



Obr. 11 Mikromechanický snímač tlaku s ref. vakuem na straně struktury [1]

Popis obrázku: 1) snímač teploty, 2) spodní část pouzdra, 3) stěna sacího potrubí, 4) těsnící kroužky, 5) konektor, 6) víko pouzdra, 7) měřicí buňka

Membrána měřicí buňky tohoto snímače je mikromechanicky vyleptána v křemíkovém čipu. Na tenké vyleptané membráně jsou nadifundovány čtyři piezorezistivní odpory viz obrázek 13. Měřicí buňka je v tomto případě obklopena referenčním vakuem na straně struktury a je zatěsněna krycím víčkem, jak je znázorněno na obrázku 12.

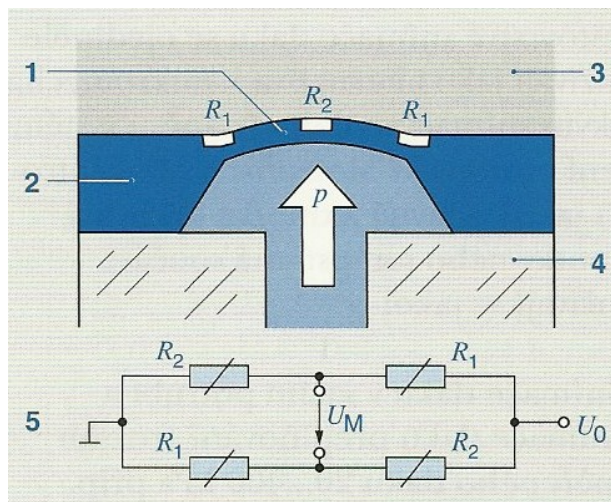


Popis obrázku: 1,3) elektrické přívody se skleněnou průchodkou, 2) referenční vakuum, 4) měřicí buňka, čip s vyhodnocovací elektronikou, 5) skleněná patice, 6) krytka, 7) přívod měřeného tlaku p

Obr. 12 Měřicí buňka s ref. vakuem na straně struktury (provedení) [1]

Princip činnosti

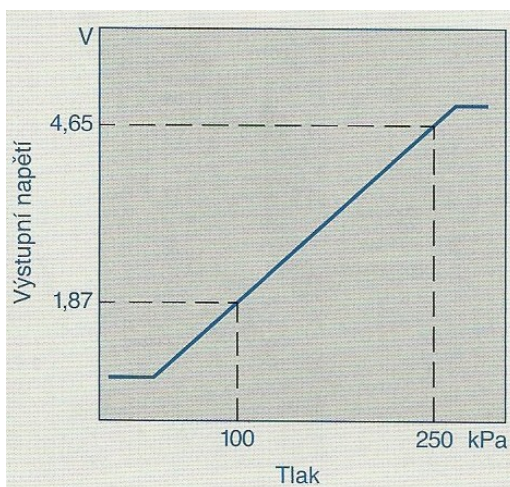
Přivedený tlak průchodkou v patici působí ze spodní strany na membránu a membrána s nadifundovanými rezistory se prohýbá. Horní strana, kde se nachází struktura membrány je obklopena vakuem, takže snímač měří absolutní hodnotu tlaku. Mechanickým napětím mění měřicí rezistory na čipu svůj odpor a jsou zapojeny tak, aby u jedné dvojice odpor klesal a u druhé naopak rostl. Zapojení rezistorů je provedeno do Wheatstonova můstku (obr. 13), kde změna odporů mění také poměr elektrických napětí a tedy výstupní napětí tohoto můstku, které je měřítkem tlaku působícího na membránu. Wheatstonovo zapojení zvyšuje citlivost snímače, protože je zde k dispozici větší napětí než při vyhodnocování jednoho rezistoru.



Obr. 13 Měřicí buňka (schéma) [1]

Popis obrázku: 1) Membrána, 2) křemíkový čip, 3) referenční vakuum, 4) skleněná patice, 5) můstkové zapojení, p - měřený tlak, U_0 - napájecí napětí, U_M - měřené napětí, $R_{1,2}$ - roztažné rezistory

Na čipu snímače je integrován zesilovač a kompenzační obvod. Vyhodnocovací elektronika má tedy za úkol zesílit měřené napětí z Wheatstonova můstku, kompenzovat vliv teploty a linearizovat tak tlakovou charakteristiku. Výstupní napětí přiváděné do řídicí jednotky pro výpočet hodnoty tlaku se pohybuje od 0 do 5V. [1]

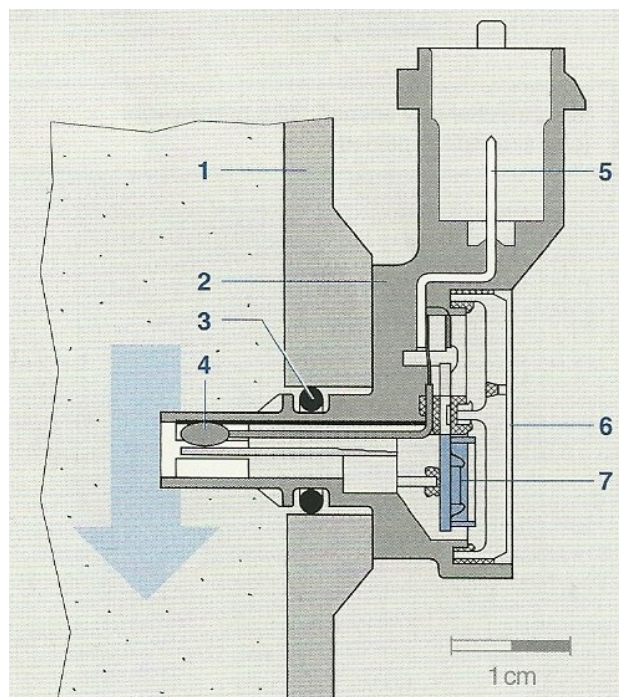


Obr. 14 Příklad charakteristiky pro snímač tlaku přepřlňování [1]

2.5. Snímač tlaku s referenčním vakuem v dutině

Úvod

Pro snímání tlaku v sacím potrubí a tlaku přepřívání se rovněž používá snímač tlaku s referenčním vakuem v dutině. Konstrukční provedení tohoto snímače (obr. 15) je oproti snímači s referenčním vakuem na straně struktury podstatně jednodušší. Také u tohoto snímače může být ve společném pouzdře integrován snímač teploty, který je vystaven proudícímu vzduchu v sacím potrubí a rychle reaguje na případné teplotní změny.

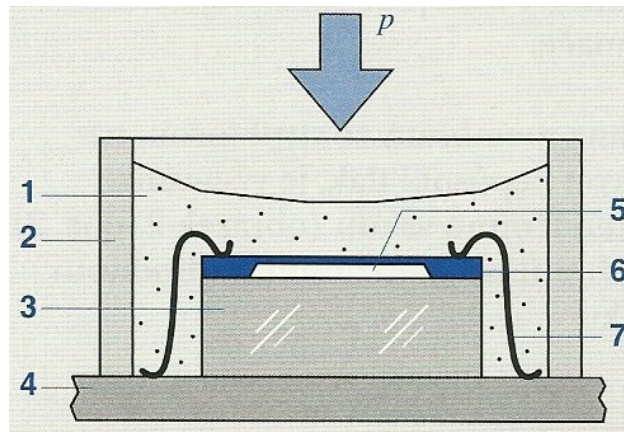


Obr. 15 Mikromechanický snímač tlaku s ref. vakuem v dutině [1]

Popis obrázku: 1) stěna sacího potrubí, 2) pouzdro, 3) těsnící kroužek, 4) snímač teploty, 5) konektor, 6) víko pouzdra, 7) měřicí buňka

Princip činnosti

U tohoto snímače tlaku nemá skleněná patice žádný průchozí otvor umožňující vstup měřeného tlaku, ale tlak působí na membránu z horní části struktury, jak je znázorněno na obrázku 16. V horní části struktury je rovněž umístěna vyhodnocovací elektronika, z tohoto důvodu je celá tato strana chráněna speciální gelovou vrstvou aby nedošlo k poškození citlivých částí působením tlaku. Stejně tak jako u snímače s referenčním vakuem na straně struktury je vyleptaná membrána na křemíkovém čipu osazena čtyřmi roztažnými rezistory zapojenými do Wheatstonova můstku. Referenční vakuum je v tomto případě uzavřeno v dutině mezi křemíkovým čipem a skleněnou paticí. Nosnou konstrukcí celého čipu je keramický prvek, který má přivařené pájecí vývody připravené pro připojení v pouzdru snímače.



Obr. 16 Měřicí buňka s ref. vakuem v dutině (provedení) [1]

Popis obrázku: 1) ochranný gel, 2) gelový rámeček, 3) skleněná patice, 4) keramický hybridní substrát, 5) dutina s referenčním vakuem, 6) měřicí buňka, čip s vyhodnocovací elektronikou, 7) přivařené vývody, p - měřený tlak

Rozdíl tohoto snímače oproti snímači s vakuem ve struktuře je v tom, že membrána s rezistory je působícím tlakem prohýbána opačným směrem. Vyhodnocovací elektronika však pracuje stejným způsobem jako u snímače s referenčním vakuem na straně struktury, tedy měřené napětí na Wheatstonově můstku je pomocí zesilovače zesíleno a kompenzačním obvodem se kompenzují vlivy teploty. Tlaková charakteristika má být rovněž lineární.

2.6. Snímač atmosférického tlaku

2.6.1. Úvod

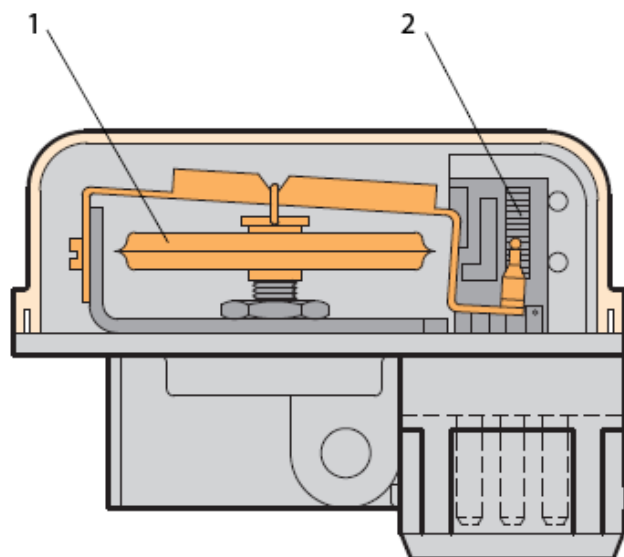
Snímač okolního atmosférického tlaku dává informaci řídicí jednotce o velikosti změny tlaku vzduchu okolního prostředí, v němž se vozidlo pohybuje v závislosti na nadmořské výšce, lze tedy zohlednit různou hustotu okolního vzduchu. Tato informace se využívá k regulaci plnicího tlaku a zpětného vedení výfukových plynů. S přibývajícím nadmořskou výškou klesá velikost atmosférického tlaku a dochází k plynulé regulaci plnicího tlaku, aby nebylo přetěžováno turbodmychadlo.

Snímač měří absolutní tlak v rozmezí 0,6 až 1,15 bar. [1] V případě poruchy tedy výpadku výstupního signálu ze snímače automaticky řídicí jednotka motoru nastaví hodnotu tlaku přepřehování na předem stanovenou hodnotu. Jedná se o bezpečnostní opatření, kdy dojde ke snížení tlaku přepřehování tak, aby nedošlo k překročení maximálních otáček turbodmychadla.

2.6.2. Provedení

Snímač bývá umístěn v motorovém prostoru nebo integrován přímo v řídicí jednotce.

Ke snímání atmosférického tlaku se využívá barometru. Příklad provedení takového barometrického snímače je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 17 Barometrický snímač tlaku [6]

Popis obrázku: 1) kryt barometru, 2) odporová dráha potenciometru

S raménkem jezdce potenciometru je spojen kryt barometru. Při změně tlaku se kryt pohybuje a současně posunuje s jezdcem potenciometru po odporové dráze. Vzniká tak signál úměrný změně tlaku, který je přiveden do řídicí jednotky. Tento systém snímání se již moc nepoužívá. U moderních vozidel se používají mikromechanické nebo tlustovrstvé snímače, ty budou popsány v dalším textu.

2.7. Tlustovrstvé snímače tlaku

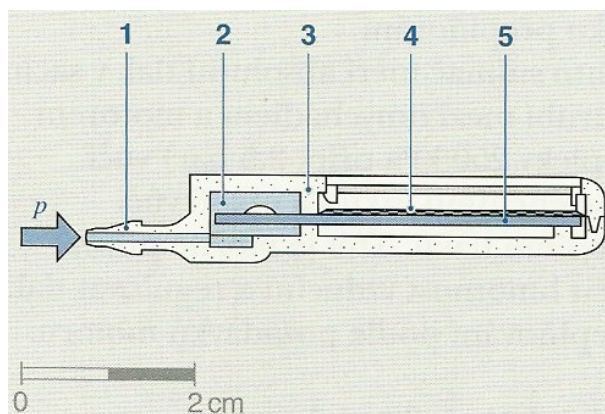
2.7.1. Úvod

Jak již bylo zmíněno, tlustovrstvé snímače tlaku se používají pro měření atmosférického tlaku okolního prostředí s měřicím rozsahem 0,6 až 1,15 bar anebo jako snímače tlaku v sacím potrubí a snímače tlaku přepřlňování, zde pracují v rozsahu 0,2 až 4 bar.

Snímače se umísťují buďto v blízkosti nebo na sacím potrubí. Jinou možností je provedení takového snímače jako integrovanou součást řídicí jednotky, v tomto případě je snímač se sacím potrubím motoru propojen hadičkou. Dnes se tyto snímače používají spíše jako alternativa k mikromechanickým snímačům.

2.7.2. Princip činnosti

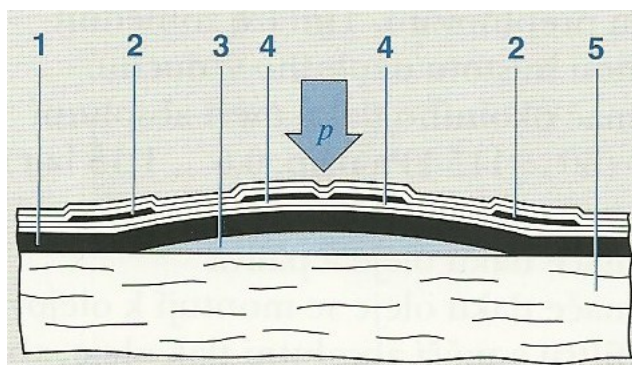
Na obrázku 18 je znázorněno provedení tlustovrstvého snímače tlaku pro montáž do řídicí jednotky. Jak je patrné z tohoto obrázku, snímač je rozdělen na dvě části, z nichž jedna část obsahuje měřící buňku propojenou s přívodem měřeného vzduchu a v druhé části je umístěna vyhodnocovací elektronika. Obě tyto části jsou na společné keramické podložce.



Obr. 18 Tlustovrstvý snímač tlaku pro montáž do řídicí jednotky [1]

Popis obrázku: měřicí část - 1) tlaková přípojka pro měřený tlak p , 2) měřicí buňka, 3) těsnící mezistěna, část zpracování signálu - 4) vyhodnocovací obvod, 5) tlustovrstvý hybridní obvod na keramickém substrátu

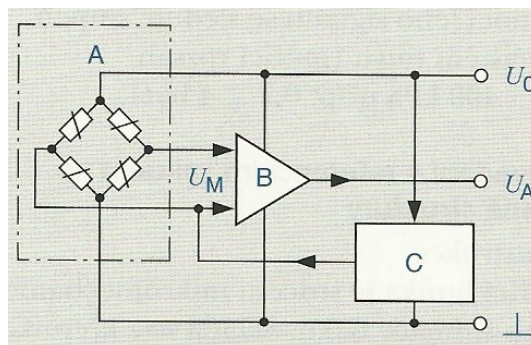
Samotná měřicí buňka je pak zobrazena na obrázku 19. Měřicí buňka je tvořena pružnou tlustovrstvou membránou prstencového tvaru. Membrána je umístěna na keramickém substrátu a mezi těmito vrstvami se nachází v komůrce referenční tlak 0,1 bar. [1] Na povrchu membrány jsou umístěny celkem čtyři roztažné piezorezistivní odpory. Dva rezistory se nachází v blízkosti středu membrány, kde je největší působení tlaku na membránu. Zbývající dvojice roztažných rezistorů je pak umístěna na okrajích membrány a slouží jako referenční rezistory pro teplotní kompenzaci a výstupní signál příliš neovlivňují.



Obr. 19 Měřicí buňka tlustovrstvého snímače tlaku [1]

Popis obrázku: 1) tlustovrstvá membrána, 2) pasivní referenční roztažné rezistory, 3) referenční tlaková komůrka, 4) aktivní roztažné rezistory, 5) keramický substrát, p - měřený tlak

Rezistory v měřicí buňce jsou zapojeny do můstku, viz obrázek 20. Přivedený tlak do měřicí buňky působí na membránu a zároveň tedy na rezistory. Rezistory mění svůj odpor a rozvažují tak můstek napájený napětím U_0 . Napětí měřené na můstku U_M je přiváděno na vstup vyhodnocovacího obvodu a je měřítkem působícího tlaku. Vyhodnocovací obvod je tvořen zesilovačem, jehož úkolem je zesílit napětí můstku U_M a kompenzačním obvodem, který kompenzuje vliv teploty. Úkolem celého vyhodnocovacího obvodu je pak linearizovat tlakovou charakteristiku a výstupní napětí U_A je přiváděno na vstup řídicí jednotky.



Obr. 20 Zapojení vyhodnocovací elektroniky tlustovrstvého snímače tlaku [1]

Popis obrázku: A) měřicí buňka, B) zesilovač, C) teplotní kompenzační obvod, U_0 - napájecí napětí, U_M - měřené napětí, U_A - výstupní napětí

2.8. Snímače vysokého tlaku

2.8.1. Úvod

Snímače vysokého tlaku pracují na obdobných principech jako snímače využívané pro měření tlaku v sacím potrubí a další výše uvedené. Ve vozidlech se snímače vysokého tlaku používají pro měření tlaku paliva a brzdové kapaliny. Tyto snímače budou popsány v následující kapitole.

2.8.2. Snímač tlaku nafty

Snímač vysokého tlaku pro měření tlaku nafty v tlakovém zásobníku je umístěn v rozdělovacím potrubí vstřikovacího systému vznětového motoru. Maximální pracovní hodnota tlaku tohoto snímače je 1600 bar. [1]

Řídící jednotka vyhodnocuje signál ze snímače tlaku a v případě odchylek od požadované hodnoty reguluje pomocí ventilu v regulačním okruhu tlak na požadovanou hodnotu. Tlak paliva je téměř konstantní a není závislý na zatížení a změně otáček motoru.

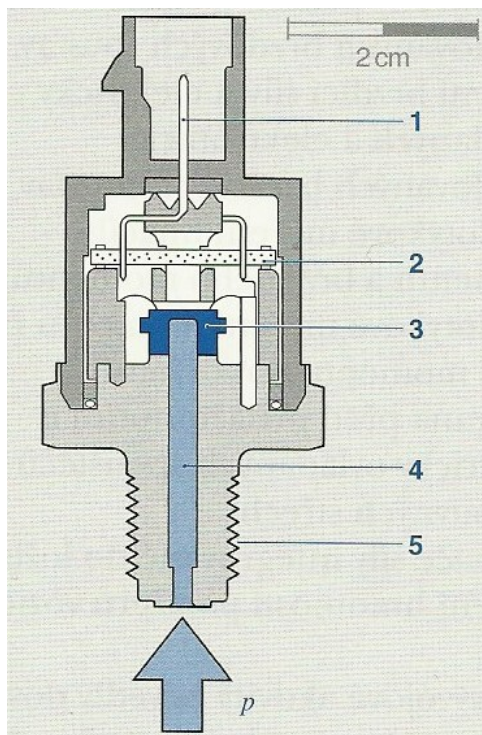
2.8.3. Snímač tlaku benzínu

U zážehového motoru s přímým vstřikováním paliva měří tlak v tlakovém zásobníku snímač vysokého tlaku umístěný v rozdělovacím potrubí. Tlak měřený snímačem se používá jako skutečná veličina pro regulaci tlaku v zásobníku.

Měřený tlak je závislý na otáčkách a zatížení motoru a jeho hodnota je 50 až 120bar. [1] Signál ze snímače tlaku je přiváděn do řídicí jednotky, kde je porovnán s požadovanou hodnotou závislou na otáčkách a zatížení uloženou v poli charakteristik. Pomocí ventilu pro řízení tlaku pak řídicí jednotka přesně nastavuje žádanou hodnotu tlaku v zásobníku.

2.8.4. Piezorezistivní snímač tlaku paliva

Základem snímače vysokého tlaku je membrána z oceli s povrchově napařenými čtyřmi piezorezistory v zapojení do Wheatstonova můstku. Z obrázku 21 je patrné, že měřený tlak je na membránu přiváděn pomocí tlakové přípojky.



Obr. 21 Piezorezistivní snímač vysokého tlaku paliva [1]

Popis obrázku: 1) elektrická přípojka (konektor), 2) vyhodnocovací obvod, 3) ocelová membrána s napařenými roztažnými rezistory, 4) tlaková přípojka, 5) upevňovací závit

Princip činnosti

Působením tlaku je membrána s rezistory prohýbána a rezistory mění svůj odpor, čímž dochází k rozvážení můstku. Wheatstonův můstek je propojen vodiči s vyhodnocovací elektronikou integrovanou ve společném pouzdru snímače. Napětí vniklé na můstku je pomocí zesilovače zesíleno v rozmezí 0 až 5V. Takto zesílené napětí je vedené do řídicí jednotky, na jehož základě je pomocí uložené charakteristiky vypočítán tlak. Měřící rozsah snímače vysokého tlaku závisí na tloušťce použité membrány. Pro vyšší tlaky je použita silnější membrána naopak pro nižší tlaky je membrána tenčí. Prohnutí membrány je cca 20 μ m při tlaku 1500bar. [1]

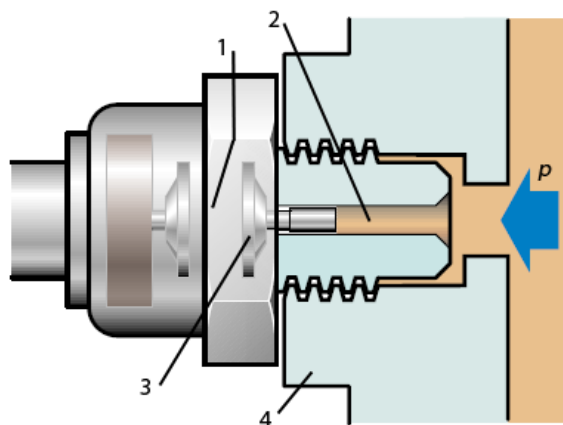
2.8.5. Snímač tlaku brzdové kapaliny

Snímač vysokého tlaku pro měření tlaku brzdové kapaliny bývá umístěn v hlavním brzdovém válci nebo našroubován v hydraulické jednotce bezpečnostních systému např. ABS nebo ESP. Pomocí snímače dostává řídicí jednotka aktuální hodnoty tlaku v brzdovém systému. Hodnota tlaku je cca 250bar a může dosahovat až 350bar. [1] Tlak vyvolává řidič sešlápnutím brzdového pedálu. Řídicí jednotka z hodnot naměřeného tlaku vypočítává brzdovou sílu kol a podélné síly působící na vozidlo. Tyto hodnoty jsou důležité především pro bezpečnostní systémy vozidla. Pokud provozní podmínky

vyžadují zásah elektronického stabilizačního systému ESP, vypočítává řídicí jednotka z hodnot tlaku i velikost stranových vodících sil. Pokud dojde k přerušení signálu od snímače a řídicí jednotka nebude mít k dispozici hodnoty tlaku brzdové kapaliny, dojde k vypnutí systému ESP.

2.8.6. Kapacitní snímač tlaku brzdové kapaliny

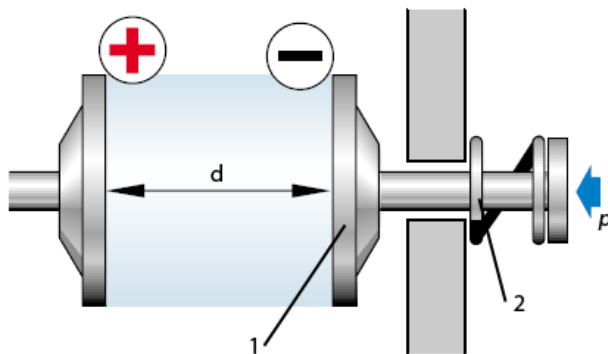
Snímač je v provedení kapacitní, může být však použit i jiný typ například piezorezistivní (viz snímač tlaku paliva).



Obr. 22 Kapacitní snímač vysokého tlaku brzdové kapaliny [7]

Popis obrázku: 1) deskový kondenzátor, 2) tlaková přípojka, 3) pohyblivá deska kondenzátoru, 4) stěna brzdového válce, p - působící tlak

Kapacitní snímač je tvořen deskovým kondenzátorem. Jedna deska je pevná a druhá pohyblivá. Mezi těmito deskami kondenzátoru je mezera, jejíž velikostí je dána kapacita kondenzátoru. Brzdová kapalina prostřednictvím tlakové přípojky působí na pohyblivou desku kondenzátoru, mezera mezi deskami se zmenšuje a roste kapacita kondenzátoru. Klesne-li tlak brzdové kapaliny, pohyblivá deska se vrací zpět, mezera se zvětšuje a kapacita kondenzátoru klesá. Vyhodnocovací elektronika integrovaná ve snímači měří tuto kapacitu a předává signál do řídicí jednotky, kde je vypočtena velikost tlaku. Změna kapacity kondenzátoru je přímo úměrná změně tlaku brzdové kapaliny. Detailnější princip viz kapitola 2.2.4. Kapacitní snímače tlaku.



Obr. 23 Detail deskového kondenzátoru kapacitního snímače [7]

Popis obrázku: 1) pohyblivá deska kondenzátoru, 2) vratná pružina, d - vzduchová mezera mezi deskami, p - působící tlak

3. Praktická část

3.1. Úvod

Praktická část se zabývá měřením a ověřováním funkčních vlastností snímače plnicího tlaku nasávaného vzduchu u vozidla s přeplňovaným vznětovým motorem s využitím dynamické válcové zkušebny a moderních měřících přístrojů.

3.2. Měření snímače plnicího tlaku nasávaného vzduchu

Snímač tlaku je pneumaticky propojen se sacím potrubím a snímá absolutní hodnotu tlaku v sání. Na základě signálu snímače tlaku pak řídicí jednotka dodatečně reguluje vstřikované množství paliva a počátek vstřiku. Řídicí jednotka také naměřené hodnoty používá pro regulaci a kontrolu plnicího tlaku. V řídicí jednotce se naměřená hodnota tlaku porovnává s požadovanými hodnotami z charakteristik plnicího tlaku. Pokud se skutečná hodnota tlaku liší od požadované, řídicí jednotka prostřednictvím regulačního ventilu nebo servomotoru turbodmychadla doreguluje plnicí tlak na správnou hodnotu. Snímač tlaku vykazuje na svém výstupu napětí v rozsahu 0-5V podle velikosti působícího tlaku. Řídicí jednotka pak má v paměti uloženy datové pole charakteristik, na základě kterých přiděluje přivedeným hodnotám napětí ze snímače odpovídající hodnoty tlaku.

Při volnoběhu motoru je sací potrubí přivřeno škrtkovací klapkou a tedy do spalovacího prostoru proudí malé množství vzduchu. V sacím potrubí tak vzniká velmi malý tlak. Naopak při velkém zatížení je škrtkovací klapka otevřena naplno a spalovací prostor se plní velkým množstvím vzduchu. Vzniká tak relativně velký tlak v sacím potrubí. Z toho vyplývá, že pokud je třeba dosáhnout velkého tlaku v sacím potrubí, musí být motor zatížen jízdou vozidla. Aby bylo dosaženo potřebného zatížení motoru, bylo při měření využito dynamické válcové zkušebny.

Testovací vozidlo:

Typ: Audi A4 Avant (8D5, B5) 1,9 TDI

Technické údaje:

Kód motoru:	AHU
Obsah:	1896 ccm
Výkon:	66 kW, 90 HP
Počet válců:	4
Příprava paliva:	přímé vstřikování



Obr. 24 Ustavení vozidla na válcové stolici

Pokud by bylo nutné ověřit, zda je snímač funkční, ideální by bylo připojit sondy osciloskopu přímo na konektor řídicí jednotky. Tím by se ověřilo, jestli se signál ze snímače skutečně dostává až do řídicí jednotky. Pokud by na konektoru řídicí jednotky nebyl žádný signál, bylo by nutné změřit výstupní signál přímo na konektoru snímače a zkontrolovat vedení jestli není přerušeno nebo není signálový vodič zkratován na kostru. V případě, že je vedení v pořádku, zbývá ještě změřit napájecí napětí snímače, které by mělo být 5V. Jestliže je vše v pořádku a na snímači nelze naměřit žádný výstupní signál jedná se o vadný snímač.

V tomto případě bylo pomocí voltmetru na konektoru snímače naměřeno (mezi pinem 3- napájecí napětí a pinem 1- kostra) napětí 4,9 V, to tedy přibližně odpovídá předepsanému napájecímu napětí 5V. Dále byl zjištěn odpor snímače tlaku 4,9k Ω pomocí ohmmetru mezi piny 4 a 1. Jelikož bylo na snímači změřeno správné napájecí napětí a paměť závad vozidla nehlásila žádné problémy, nebylo nutné měřit snímač na konektoru řídicí jednotky.

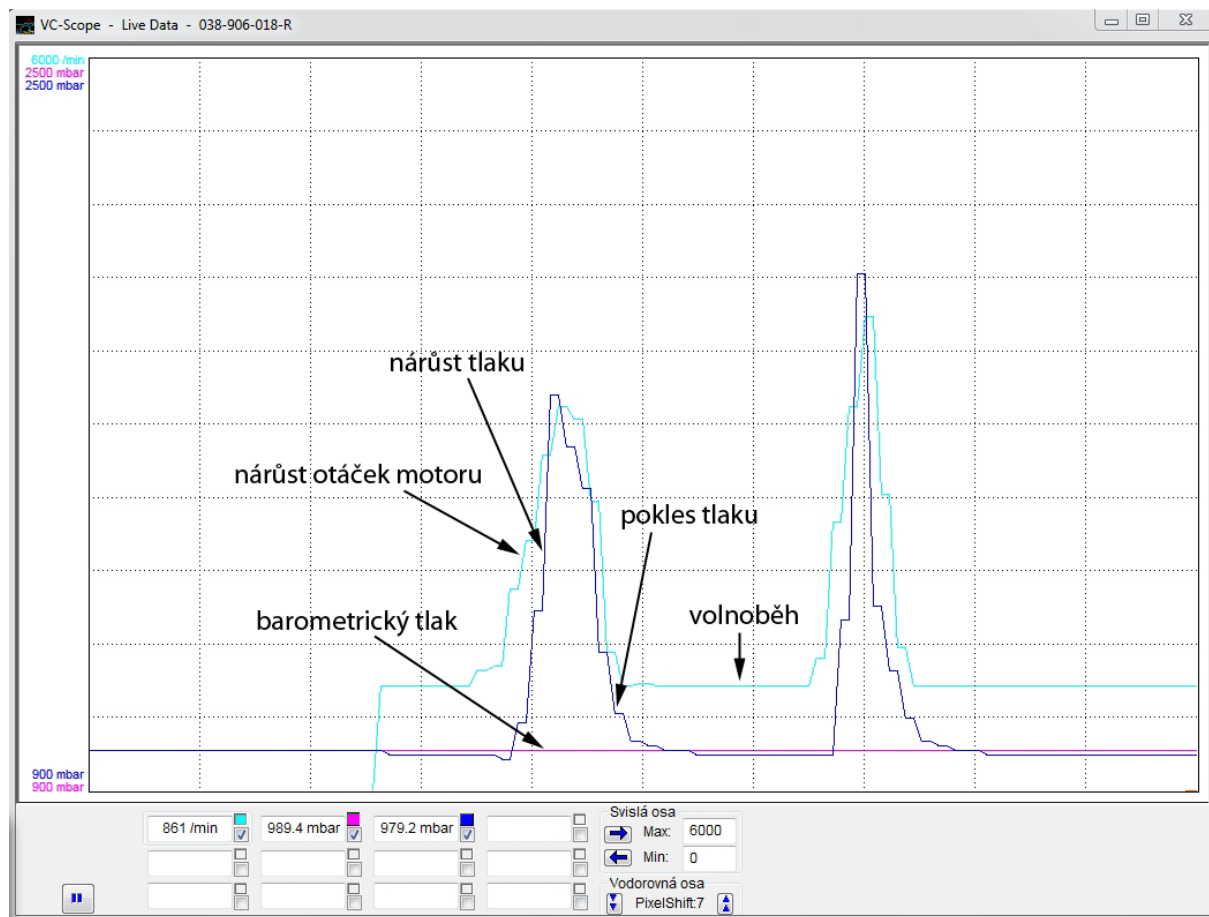


Obr. 27 Připojení osciloskopu na konektoru snímače

Pro paralelní diagnostiku byl použit osciloskop diagnostické stanice Bosch FSA 740, sondy osciloskopu (ve schématu označen „OSC“) byly připojeny na konektoru snímače mezi pin výstupního signálu 4 a kostru 1. Pro měření sériovou diagnostikou bylo využito programu VCDS a počítače připojeného diagnostickým kabelem v zásuvce palubní diagnostiky vozidla.

Měření průběhu tlaku sériovou diagnostikou:

Měření pomocí sériové diagnostiky programem VCDS 805. Měření závislosti tlaku na zatížení a otáčkách probíhalo při zařazeném prvním rychlostním stupni a prudkým sešlápnutím pedálu akcelerační do vyšších otáček než volnoběžných. Naměřený průběh je na následujícím obrázku.

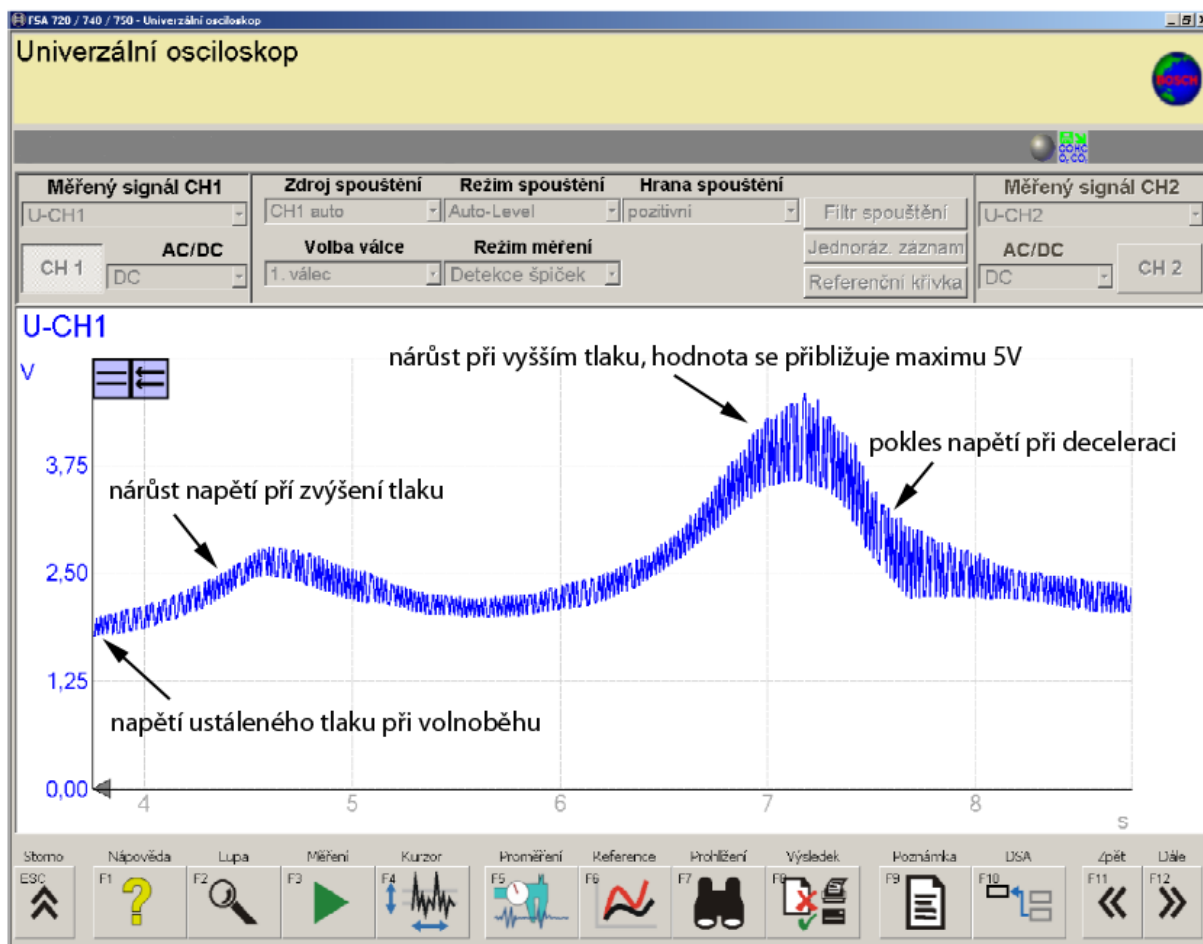


Obr. 28 Průběh tlaku a otáček motoru získaný pomocí sériové diagnostiky

Z obrázku naměřených průběhů je patrné, že s rostoucími otáčkami motoru, tedy větším zatížením současně roste tlak. Po nastartování vozidla byla hodnota tlaku přibližně rovna hodnotě tlaku barometrickému, otáčky motoru v tuto chvíli rostou na hodnotu volnoběžných otáček 861 ot./min. Při zařazení prvního stupně a sešlápnutí akceleračního pedálu je vidět v grafu prudký nárůst otáček na hodnotu přibližně 3120 ot./min. a současný nárůst tlaku na hodnotu 1748 mbar. Po dosažení této hranice byl ihned pedál akcelerační uvolněn, dochází k deceleraci a hodnoty tlaku a otáček poklesly na původní hodnotu. Dále je v grafu zobrazen průběh, kdy byl pedál akcelerační sešlápnut na delší dobu, motor se tedy dostává až do 3900 ot./min a hodnota tlaku narůstá až na hodnotu 2020 mbar. Při dosažení této hranice byl opět uvolněn pedál akcelerační a tlak skokově klesá současně s otáčkami.

Měření snímače tlaku paralelní diagnostikou:

Současně při měření sériovou diagnostikou bylo také provedeno měření výstupního signálu snímače tlaku paralelní diagnostikou pomocí osciloskopu diagnostické stanice FSA 740 od firmy Bosch. Následující obrázek zachycuje průběhy naměřené na snímači.



Obr. 29 Napětí na snímači tlaku měřené osciloskopem

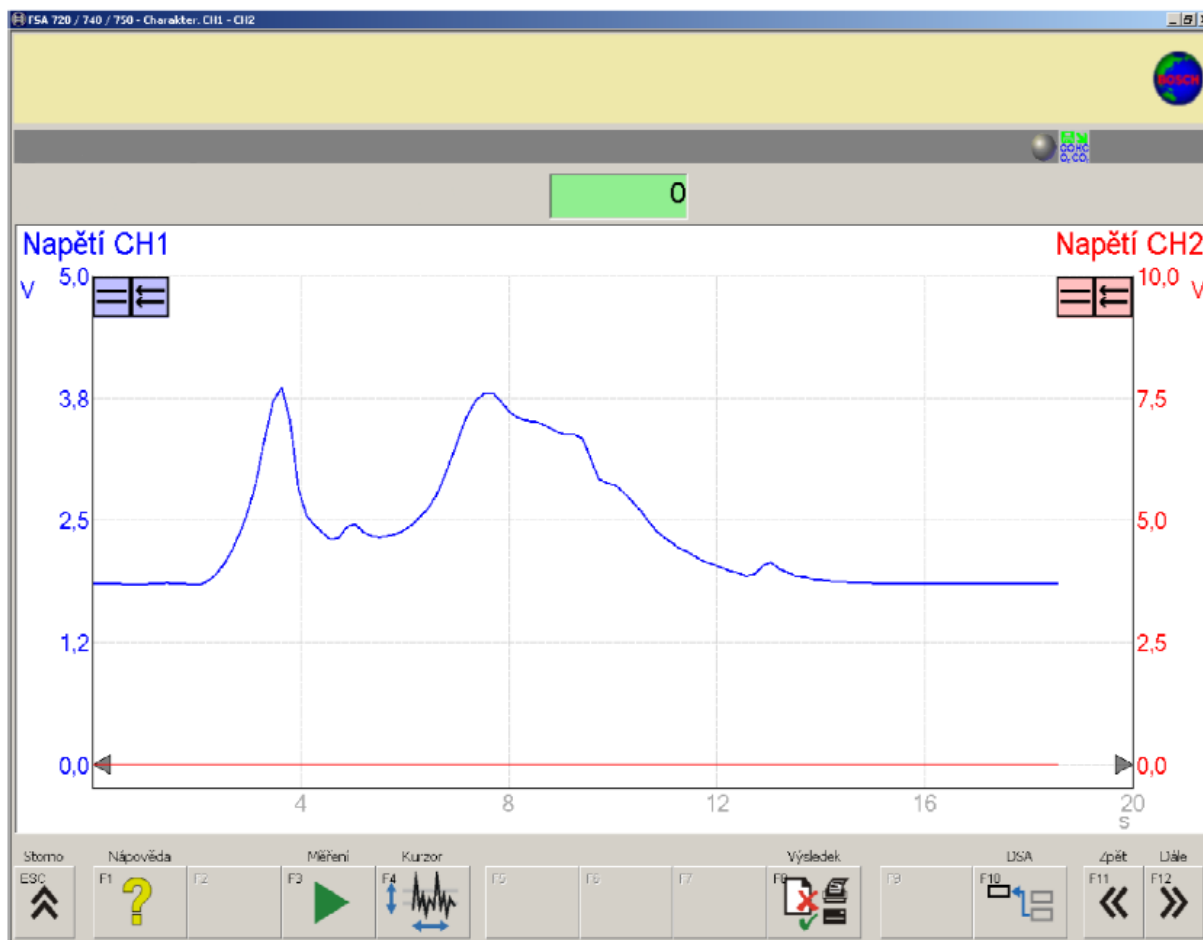
Pro měření výstupního napěťového signálu snímače tlaku byla zvolena funkce univerzální osciloskop. Jak již bylo řečeno, sondy osciloskopu byly připojeny na pinech konektoru snímače 1- kostra a pin 4- výstupní signál. V porovnání s předchozím obrázkem 28. je vidět, že průběh výstupního napětí snímače je podobný průběhu tlaku, měřeného sériovou diagnostikou. Vyskytují se zde však odlišnosti způsobené časovým zpožděním komunikace sériové diagnostiky. Výstupní napěťový signál odpovídá hodnotám tlaku a pohybuje se v rozsahu od 0 do 5V respektive několik mV nad nulou a pod 5V.

Z obrázku je patrné, že při ustáleném tlaku, který je na snímači při volnoběžných otáčkách se napětí pohybuje na hodnotě 2V. Zvýšíme-li zatížení motoru sešlápnutím pedálu akceleraace, roste tlak a tedy výstupní napětí ze snímače. Pro první zvýšení tlaku na hodnotu 1748 mbar se napětí na snímači zvýšilo na hodnotu kolem 3V. Při deceleraci dochází k poklesu tlaku a tedy napětí na snímači. Druhý napěťový nárůst reprezentuje zvýšení tlaku tentokrát na vyšší hodnotu tlaku 2020 mbar. Napětí tedy roste na hodnotu vyšší a při dosažení maximální hodnoty tlaku se hodnota pohybuje nad 4V. Při uvolnění pedálu akceleraace tlak a napětí opět klesá na hodnotu volnoběhu.

Pokud bychom motor zatížili ještě více, tlak by narostl na hodnotu kolem 2500 mbar a napětí na snímači by se pohybovalo kolem maximální hodnoty 5V. Kmitající průběh napětí je způsobený

pulzacemi v sání vznikajícími zavíráním a otevíráním sacích ventilů. Tento signál tedy dobře zobrazuje dění v sacím potrubí.

Řídící jednotka však napěťový signál ze snímače tlaku dostává vyfiltrováný. Kmitání způsobené pulzacemi v sání je potlačeno a řídící jednotka tak dostává přesné hodnoty napětí odpovídající tlaku. Příklad takového průběhu je zobrazen na následujícím obrázku 30.



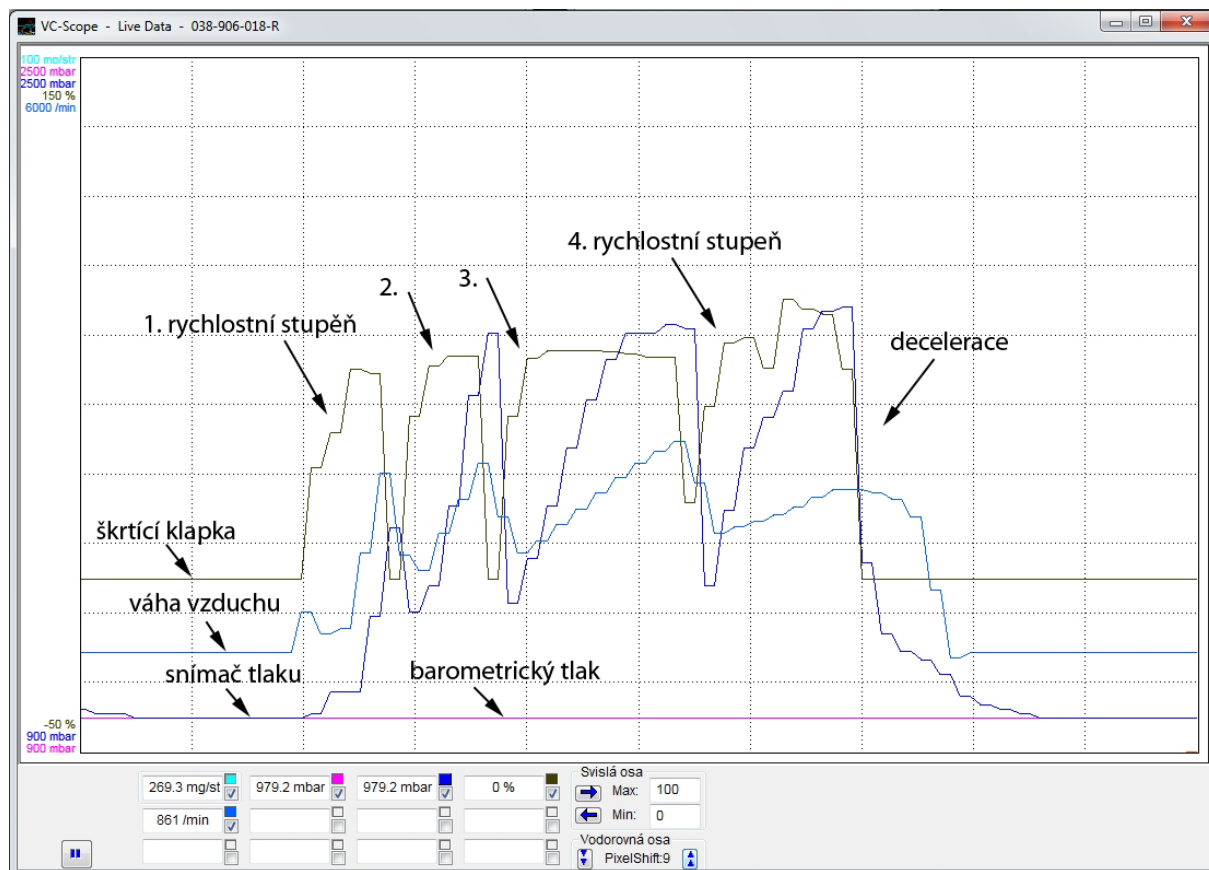
Obr. 30 Průběh výstupního napětí snímače tlaku bez kmitání

Průběh na tomto obrázku opět představuje nárůsty a poklesy výstupního napětí snímače tlaku při zvyšování a snižování tlaku způsobeném zatěžováním motoru.

Na základě takového průběhu řídící jednotka přiřazuje hodnotám napětí skutečné hodnoty tlaku podle převodní charakteristiky, kterou má uloženu v paměti. Takto převedené hodnoty tlaku pak mohou být z řídící jednotky vyčteny testerem nebo sériovou diagnostikou a zobrazeny přímo v příslušných jednotkách tlaku. Za použití specializovaného diagnostického softwaru pak není problém z těchto hodnot vykreslit aktuální průběhy tlaku jak je tomu v případě měření na obrázku 28.

Měření tlaku vzduchu při běžné jízdě vozidla

Pro přehled chování průběhu tlaku při běžné jízdě vozidla byla nasimulována jízda vozidla od rozjezdu na 1. rychlostní stupeň až po zařazení čtvrtého stupně. Měření bylo opět provedeno pomocí sériové diagnostiky VCDS.



Obr. 31 Průběh tlaku při řazení rychlostních stupňů

Při tomto měření byla využita možnost programu VCDS zobrazit jak průběhy tlaku tak i otevření škrtící klapky a snímače hmotnosti nasávaného vzduchu. Po zařazení prvního rychlostního stupně a následné akceleraci byla škrtící klapka otevřena přibližně na 50% v tuto chvíli se tlak dostal na hodnotu asi 1400 mbar, rovněž je z grafu patrný nárůst hmotnosti vzduchu. Při řazení druhého rychlostního stupně se škrtící klapka zavírá a tlak v sání klesá. Tlak však klesá pouze na hodnotu 1220 mbar, neboť při dosažení této hodnoty již došlo k přechodu a nastává opět akcelerace. Škrtící klapka je otevřena přibližně z 50%, tlak narůstá ovšem nyní už na vyšší hodnotu 1860 mbar. Podobný průběh je i při řazení na 3. stupeň s tím rozdílem, že vozidlo jelo na tento rychlostní stupeň delší dobu a tlak narůstá pomaleji. Při jízdě na 4. rychlostní stupeň byla škrtící klapka otevřena až z 80%, tlak se krátkodobě dostal až na hodnotu 2000 mbar. Následuje decelerace, uzavření škrtící klapky a tlak již klesá na hodnotu při volnoběhu. Měření pro 5. rychlostní stupeň nebylo provedeno, ale dá se předpokládat stejný průběh měřených hodnot. Rovněž v grafu měření nebyly zobrazeny otáčky motoru.

4. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá funkčními vlastnostmi a koncepčním řešením snímačů tlaku využívaných v automobilové elektronice pro moderní elektronické systémy řízení zážehových a vznětových motorů. Na úvod se zabývá důležitými požadavky, které snímače musí v této velmi náročné oblasti splňovat, ať už se jedná o jejich konstrukční provedení nebo nároky na přesnost měření. Dále se zaměřuje na technologie dnes nejrozšířenějších mikromechanických snímačů tlaku, zejména piezorezistivních a kapacitních. Detailněji byly popsány konstrukční a funkční vlastnosti snímačů atmosférického tlaku, plnicího tlaku, snímače tlaku v sacím potrubí a snímačů vysokých tlaků paliva a brzdové kapaliny.

V praktické části bakalářské práce bylo provedeno ověření funkčních vlastností snímače plnicího tlaku Bosch 038 906 051. Pro měření bylo využito vozidlo se vznětovým přeplňovaným motorem Audi A4 Avant 1,9TDI. Vozidlo bylo při měření ustaveno na dynamické válcové stoličce, aby bylo dosaženo potřebného zatížení motoru a mohla být nasimulována jízda vozidla, odpor jízdy byl nastaven na 1500Nm. Na příslušných pinech podle schématu zapojení bylo voltmetrem ověřeno napájecí napětí snímače 5V. Měření výstupního signálu snímače tlaku bylo provedeno pomocí osciloskopu paralelního diagnostického zařízení Bosch FSA740 a sériovým diagnostickým zařízením VCDS, které umožňuje měřit současně s tlakem i otáčky motoru a otevření škrtící klapky. Bylo provedeno několik měření při různých zatíženích vozidla. Naměřené průběhy jsou ve formě obrázků uvedeny a detailně popsány v praktické části této bakalářské práce.

Na základě této práce byla vypracována laboratorní úloha měření snímače plnicího tlaku, která může být využita pro cvičení předmětu automobilová elektronika.

5. Použité zdroje a citace

- [1] ZABLER, Dr.-Ing. Erich, et al. *Snímače v motorových vozidlech*. Praha : Robert Bosch odbytová s.r.o., 2001. 148 s. ISBN 80-903132-5-6.
- [2] RŮŽIČKA, Radek. *Optická vlákna jako snímače teplot a deformací a jejich aplikace v chytrých konstrukcích* [online]. [s.l.], 2006. 18 s. Seminární práce. ČVUT fakulta dopravní. Dostupné z WWW: <http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/ths/ruzicka_opticka_vlakna.pdf?
- [3] "Pumped Up," *Feature Article* [online]. 2005 [cit. 2011-05-04]. FEATURE FOCUS: MEMS. Dostupné z WWW: <<http://www.memagazine.org/contents/current/features/pumpedup/pumpedup.html>>.
- [4] TUDOR, M.J. *Automotive sensors* [online]. New York : Momentum Press, 2009 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.google.com/books?id=hSX0curtUWkC&lpg=PA37&ots=AYLbWjfNnI&dq=automotive%20pressure%20sensor&lr&hl=cs&pg=PP1#v=onepage&q=automotive%20pressure%20sensor&f=false>>.
- [5] STEINBRENNER, Dipl.-Ing. Ulrich, et al. *Systém řízení motoru Motronic*. Praha : Robert Bosch odbytová s.r.o., 1999. 70 s. ISBN 80-902585-3-0.
- [6] ŠKODA AUTO a.s. *Škoda Octavia, motor 1,8I turbo*. Praha 4 : Škoda Auto a.s., 1998. 34 s.
- [7] ŠKODA AUTO a.s. *Octavia, ESP - snímače, konstrukce, funkce*. Praha 4 : Škoda Auto a.s., 2001. 42 s.

6. Seznam příloh

Příloha I: Laboratorní úloha

Příloha II: Vypracování laboratorní úlohy